

VŠB - Technická univerzita Ostrava

Fakulta strojní

Katedra mechaniky



Měření přenosových vlastností reproduktorových systémů

Measuring of Frequency Response For a Loudspeaker System

Student:

Jakub Cinkraut

Vedoucí bakalářské práce:

Ing. Michal Weisz

Ostrava 2013

Zadání bakalářské práce

Student:

Jakub Cinkraut

Studijní program:

B2341 Strojírenství

Studijní obor:

3901R003 Aplikovaná mechanika

Téma:

Měření přenosových vlastností reproduktorových systémů
Measuring of Frequency Response For a Loudspeaker System

Zásady pro vypracování:

- Rozbor základních technik, používaných při zjišťování přenosových vlastností reproduktorových systémů.
- Návrh měřicího řetězce a konkretizace zpracovaných měřicích technik do podoby projektů v aplikaci B&K Pulse - LabShop.
- Výběr optimální metody měření.
- Vývoj funkční aplikace v prostředí LabView, zahrnující zvolenou metodu měření.
- Odladění vytvořené aplikace na měřicí kartě NI.

Seznam doporučené odborné literatury:

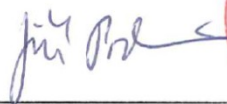
- [1] Škvor, Z.: Akustika a elektroakustika. Academia, Praha 1991, ISBN 80-200 0461-0
- [2] Smetana, C.: Hluk a vibrace, měření a hodnocení. Sdělovací technika, Praha 1998, ISBN 80-90 1936-2-5
- [3] ISO 3745, Akustika – Určování akustického výkonu zdrojů hluku pomocí akustického tlaku – Přesné metody pro bezodrazové a polobezodrazové místnosti
- [4] ČSN IEC 268: Elektroakustická zařízení, Část 1. – 17.

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Michal Weisz**

Datum zadání: 14.12.2012

Datum odevzdání: 20.05.2013



doc. Ing. Jiří Podešva, Ph.D.
vedoucí katedry



doc. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.
děkan fakulty

Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou bakalářskou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

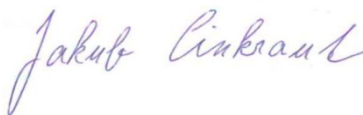
V Ostravě*20.5. 2013*.....

podpis studenta: *Jakub Cinkraut*

Prohlašuji, že

- jsem byl seznámen s tím, že na moji diplomovou (bakalářskou) práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě diplomovou (bakalářskou) práci užít (§ 35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že diplomová (bakalářská) práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího diplomové (bakalářské) práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – diplomovou (bakalářskou) práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- beru na vědomí, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě : 20.5.2013


.....
podpis

Jméno a příjmení autora práce:

Jakub Cinkraut

Adresa trvalého pobytu autora práce:

Lidická 1267, Třinec, Česká Republika

ANOTACE DIPLOMOVÉ PRÁCE

CINKRAUT, J. *Měření přenosových vlastností reproduktorových systémů*: bakalářská práce. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra mechaniky, 2013, 64 s. Vedoucí práce: Weisz, M.

Tato práce se zabývá analýzou vybraných metod pro zjišťování přenosových vlastností reproduktorových systémů a následným vývojem funkční aplikace, sloužící ke zpracování naměřených signálů. V úvodu jsou popsány fyzikální zákonitosti a děje týkající se šíření zvuku, spolu s důležitými poznatky o reproduktorech, jenž jsou předpokladem pro porozumění stěžejních principů v dané oblasti. Následně jsou detailně rozebrány jednotlivé techniky pro zjišťování přenosových charakteristik, přičemž je na základě srovnání těchto postupů vybrána optimální metoda pro měření frekvenční přenosové funkce reproduktorové soustavy. Tato metoda je posléze implementována do funkční aplikace vyvinuté v prostředí LabVIEW, kterou lze plnohodnotně nahradit komerční aplikací, pro tento účel nabízené. V konečné fázi je poté aplikace odladěna na měřicí kartě NI a její finální verze je součástí CD přílohy této práce.

ANNOTATION OF MASTER THESIS

CINKRAUT, J. *Measuring of Frequency Response For a Loudspeaker System*: Bachelor Thesis. Ostrava: VŠB–Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Mechanics, 2013, 64 p. Thesis head: Weisz, M.

This thesis deals with the analysis of chosen methods for determining frequency response of loudspeaker systems followed by software development used to processing of measured signals. In the introduction, physical laws regarding propagation of the sound and essential features of speakers are described which makes key prerequisites for understanding the basic principles behind this field. Thereafter thorough analysis of particular techniques for identification of transmission characteristics is made and on the base of comparison of these techniques the optimal method is chosen. Subsequently, the best method is implemented into the virtual instrumentation in LabVIEW which will be alternative to commercial applications which are available for this purpose. Finally, created application is debugged through NI's measuring modules and it is included on the attached CD.

Obsah

Seznam použitých značek a symbolů	- 8 -
Úvod	- 10 -
1 ZVUK.....	- 11 -
1.1 Podstata vzniku a přenosu zvuku	- 11 -
1.2 Parametry zvuku.....	- 12 -
1.2.1 Hladina akustického tlaku.....	- 12 -
1.2.2 Intenzita zvuku.....	- 14 -
1.3 Zvuková pole.....	- 15 -
1.3.1 Volné akustické pole.....	- 15 -
1.3.2 Difuzní pole	- 16 -
2 Elektroakustické měniče - reproduktory.....	- 17 -
2.1 Základní rozdělení měničů	- 17 -
2.1.1 Podle frekvenčního rozsahu.....	- 17 -
2.1.2 Podle principu činnosti	- 18 -
2.1.3 Podle způsobu užití.....	- 18 -
2.2 Konstrukce reproduktorů	- 19 -
2.3 Parametry reproduktoru	- 20 -
2.4 Reproduktorové systémy.....	- 20 -
3 Charakteristiky reproduktorových systémů	- 21 -
3.1 Frekvenční přenosová funkce	- 22 -
3.1.1 Pravidla pro měření frekvenční přenosové funkce	- 25 -
3.2 Směrová charakteristika, index směrovosti.....	- 25 -
3.3 Dělicí kmitočty.....	- 26 -
3.4 Frekvenční rozsah	- 27 -
4 Návrh měřicí metody	- 28 -
4.1 Návrh měřicího řetězce	- 28 -

4.1.1	Analyzátor.....	- 29 -
4.1.2	Mikrofon	- 30 -
4.1.3	Zesilovač.....	- 31 -
4.1.4	Reproduktorová soustava.....	- 31 -
4.1.5	Měřicí karta.....	- 33 -
4.1.6	Polobezodrazová místnost	- 33 -
5	Metody pro měření FRF a amplitudové frekvenční charakteristiky	- 35 -
5.1	Buzení ustáleným harmonickým signálem (čistými tóny).....	- 35 -
5.2	Buzení spojitě rostoucím kmitočtem (SWEEP).....	- 36 -
5.3	Metoda hodnocení pomocí náhodného hluku	- 38 -
5.3.1	Dopravní zpoždění	- 41 -
5.4	Metoda vyhodnocení FRF z impulzní odezvy	- 44 -
5.4.1	Impulzní charakteristika	- 45 -
5.5	Zhodnocení použitých metod	- 48 -
5.6	Výběr optimální metody měření	- 49 -
6	Vývoj měřicí aplikace v prostředí LabVIEW	- 49 -
7	Odladění vytvořené aplikace na měřicí kartě NI.....	- 52 -
8	Závěr	- 55 -
9	Seznam použité literatury	- 56 -
10	Seznam příloh.....	- 58 -
PŘÍLOHY	- 60 -

Seznam použitých značek a symbolů

Značka	Název veličiny	Jednotka
c	Rychlost zvuku v daném prostředí	$m \cdot s^{-1}$
f	Frekvence	Hz
I	Akustická intenzita	$W \cdot m^{-2}$
I_0	Referenční hodnota akustické intenzity	$W \cdot m^{-2}$
I_x	Složka akustické intenzity	dB
L_I	Hladina zvukové intenzity	dB
L_P	Hladina akustického tlaku	dB
SPL	Hladina akustického tlaku (angl. Sound Pressure Level)	dB
P_{RMS}	Efektivní hodnota akustického tlaku	Pa
p_{ref}	Referenční hodnota akustického tlaku	Pa
R_{xx}	Autokorelační funkce	-
S	Plocha	m^2
S_{xx}	Spektrální výkonová hustota	-
t	Čas	s
P	Akustický výkon	W
$\delta(\tau)$	Diracův impuls	-
λ	Vlnová délka	m
ρ	Hustota média pro šíření zvuku	$kg \cdot m^{-3}$
σ	Směrodatná odchylka	-
τ	čas	s
ω	Úhlový kmitočet	$rad \cdot s^{-1}$

Zkratka	Celý název
AD	Analogově-digitální (převodník)
B&C	B&C Speakers - název firmy vyrábějící reproduktory
B&K	Brüel & Kjær (dánský výrobce měřicí techniky)
BNC	Typ propojovacích konektorů (Bayonet Neill–Concelman)
CD	Kompaktní disk (angl. Compact Disc)
CPB	Constant Percentage Band – konstantní relativní šířka pásma
DA	Digitálně - analogový (převodník)
DC	Stejnoseměrné napětí (angl. Direct Current)

DFT	Diskrétní Fourierova transformace
FFT	Rychlá Fourierova transformace
FRF	Frekvenční přenosová funkce (angl. Frequency response function)
Hi-fi	Vysoká věrnost reprodukce akustického signálu (angl. High Fidelity)
IR	Impulzní odezva (angl. Impulse Response)
LAN	Připojení místní sítě (angl. Local Area Network)
LTI	Lineární časově invariantní (systém)
NI	National Instruments (americká firma)
PC	Osobní počítač (angl. Personal Computer)
RCF	Firma vyrábějící reproduktory
TEDS	Automatická identifikace snímače (Transducer Electronic Data Sheet)
VI	Virtuální nástroj (Virtual Instrument) - aplikace vytvořená v LabVIEW

Pozn.: Ostatní značky a zkratky jsou definovány přímo v příslušných kapitolách u výpočtů.

Úvod

Od sestrojení prvního reproduktoru Alexandrem Grahamem Bellem uplynulo již bezmála 140 let, avšak nedá se říci, že by se za tu dobu jeho vynález zdokonalil natolik, aby se vývoj reproduktoru zastavil. Naopak, tato oblast inženýrského konstruování je stále z velké části neprobádaná, a tudíž i dynamicky se rozvíjející. Akustičtí inženýři tak ustavičně vylepšují konstrukce reproduktorových soustav a také používají nové kombinace materiálů pro reproduktorové membrány, cívky a ozvučnice.

Celý tento trend se odvíjí od zákazníků, kteří jsou stále náročnější, co se kvality zvuku a věrnosti projevu reproduktorových soustav týče. Na straně druhé stojí konstruktéři těchto soustav, kteří musí čelit různým fyzikálním překážkám a snažit se je vhodným způsobem obejít. V dřívější době byl takovýto vývoj realizován metodou pokusu a omylu, přičemž bylo zapotřebí vyrábět funkční prototypy, které nefungovaly vždy tak, jak by si konstruktér představoval. Teprve až s rozvojem výpočetní techniky jsme schopni modelovat a simulovat chování těchto elektroakustických prvků, a dokonce i jejich interakci s akustickými médii, která může být mnohdy nelineárního charakteru.

V poslední době se začíná rovněž používat akustických kamer založených na principu akustické holografie, které dokážou vizualizovat zvukové vlny šířící se z reproduktoru, jejich směr, intenzitu i frekvenci.

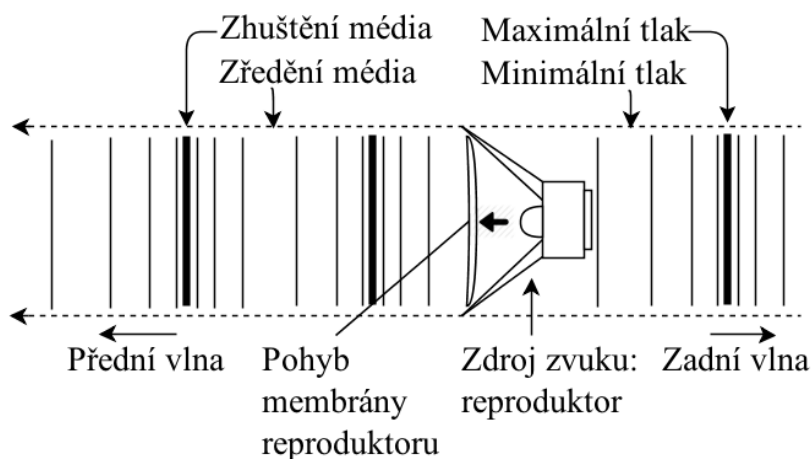
Jedním z nejdůležitějších parametrů reproduktorových soustav je jejich frekvenční charakteristika, která zjednodušeně udává přesnost jejich zvukového projevu, co se poměru amplitud jednotlivých vyzařovaných frekvenčních složek týče. Získání průběhu frekvenční charakteristiky představuje jednu z nejdůležitějších fází při konstrukci těchto soustav. Vlastní vývoj reproduktorových soustav se ubírá ke snaze o vyrovnanou frekvenční charakteristiku, jež může být zárukou věrného projevu. Kvalita vyrobené reproduktorové soustavy samozřejmě nezávisí jen na její přenosové funkci, ale také na mnoha dalších parametrech, jak bude dále přiblíženo.

Předmětem této bakalářské práce je především návrh nejoptimálnější metody pro měření frekvenčních charakteristik. V další části práce se zaměříme také na vývoj měřicí aplikace určené pro usnadnění a urychlení získání průběhu frekvenční přenosové funkce. Poslední část této práce pak bude věnována samotnému odladění vytvořeného softwarového nástroje a podrobného popisu, sloužícímu pro jeho další využití.

1 ZVUK

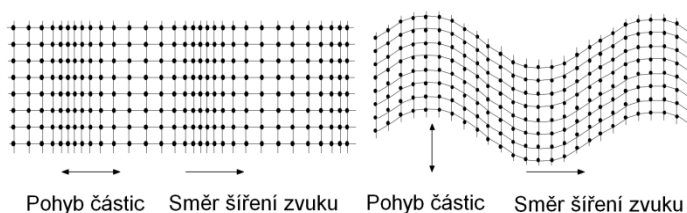
1.1 Podstata vzniku a přenosu zvuku

Zvuk ve své podstatě spadá do oboru mechaniky zabývající se kmitáním a vlněním. Tento fyzikální jev můžeme charakterizovat jako mechanické kmitání pružného prostředí, šířící se v čase s určitou rychlostí, intenzitou a frekvencí. Pro přenos zvuku je zapotřebí určité médium umožňující změnu hustoty částic, která je způsobena právě tímto mechanickým vlněním. Z tohoto důvodu se zvuk ve vakuu nešíří, přičemž naopak v plynech, kapalinách i pevných látkách tento jev pozorovat můžeme. V důsledku vlnění tak vlastně dochází ke zhušťování a zředění akustického prostředí, čímž je vyvolána akustická vlna o určité rychlosti.[1] Jednotlivé částice se ale nepohybují ve směru vlnění, nýbrž kmitají pouze kolem svých rovnovážných poloh. Lidské ucho vyhodnocuje změny tlaku vzduchu, ať už se jedná o lokální snížení nebo zvýšení.[2] Princip šíření vlny spolu s charakteristickými změnami tlaku popisuje následující obrázek (Obrázek 1).



Obr. 1.1: Princip vzniku zvuku

Vlnění dělíme na podélné a příčné na základě toho, jestli částice prostředí kmitají ve směru šíření vlnění nebo kolmo k němu (Obr. 1.2). U kapalin a plynů se vyskytuje pouze akustické vlnění longitudinální, naopak u materiálů elastických se můžou vyskytovat oba typy vlnění. Akustické vlnění se od zdroje šíří ve vlnoplochách, dle Huygensova principu o šíření vlnění. Vlnoplocha spojuje místa, kam dorazí rozruch se stejnou fází a za stejnou dobu.[3] Kolmice na tyto vlnoplochy jsou poté nazývány akustickými paprsky.



Obr. 1.2: Znárodnění podélného a příčného vlnění

Další znak, ovlivňující přenos zvuku, je teplota prostředí. Na základě Brownova pokusu s pylovými zrnky ve vodě víme, že čím je teplota vyšší, tím je fluktuace částic v médiu větší, díky čemuž se také zvuková vlna může šířit rychleji.[4]

1.2 Parametry zvuku

Abychom byli schopni matematicky popsat akustické vlnění, je třeba zavést určité energetické veličiny podávající vzájemnou souvislost mezi jednotlivými parametry.[5] Tyto veličiny byly odvozeny převážně s ohledem na vjemové schopnosti člověka a uvážení nelinearity jeho sluchového aparátu. Tento důvod vedl k vyjádření vjemových veličin v logaritmické škále, která je vždy vztažena k určité referenční hodnotě.

1.2.1 Hladina akustického tlaku

Stejně jako lidské ucho, i měřicí technika nejčastěji pracuje na principu vyhodnocování změn tlaku vzduchu. Nejmenší změna tlaku, kterou je lidský sluchový orgán schopen vyhodnotit, je 1 dB a způsobí vychýlení jeho membrány o hodnotu menší než je průměr jediného atomu. Oproti tomu může lidské ucho snést i 10^6 krát větší akustické tlaky. [1]

Z tohoto důvodu byla zavedena referenční hodnota tlaku $p_{\text{ref}} = 20 \mu\text{Pa}$, které odpovídá hladina 0 dB a zároveň je pro člověka považována za práh slyšitelnosti při frekvenci 1 kHz, na kterou je lidské ucho nejcitlivější. V praxi se tato veličina používá často pro měření hlasitosti vyzařované ze zdroje. Je to však hodnota skalární nesoucí informaci jen o magnitudě zvuku, ne však o jeho směru. Hodnotu hladiny akustického tlaku L_p [dB] nebo také SPL (z anglického "Sound Pressure Level") vypočítáme jako efektivní hodnotu akustického tlaku vztaženou k referenční hodnotě dle vztahu (1.1).

$$L_p = 20 \log\left(\frac{p_{RMS}}{p_{ref}}\right) \quad (1.1)$$

Přičemž p_{RMS} odpovídá efektivní hodnotě sledovaného akustického tlaku, kterou určíme ze vztahu (1.2).

$$p_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T p^2(t) dt} \quad (1.2)$$

Následující tabulka (Tabulka 1) ilustruje výčet běžných hluků, se kterými se lze setkat v každodenním životě. Rozsah je zde vztažen na člověka, proto je uvedená škála v rozmezí od prahu slyšitelnosti po práh bolesti.

SPL [dB (A)]	Akustický tlak [μ Pa]	Příklad	Vliv na člověka
140	10^8	Práh bolesti	Porucha sluchu i při krátkodobém působení hluku
130		Start letadla (100 m)	
120	10^7	Start letadla (300 m)	
110		Rockový koncert	Porucha sluchu při dlouhodobém vystavení působení hluku
100	10^6	Pila, sbíječka	
90		Nákladní doprava	Silné obtěžování a snížení psychické výkonnosti
80	10^5	Silniční doprava	
70		Hlučná ulice	
60	10^4	Běžná konverzace	
50		Obývací pokoj	Slabé rušení
40	10^3	Knihovna	
30		Ložnice	
20	10^2	Les (šepot)	Žádné nebo občasné rušení
10		Akustická laboratoř	
0	20	Práh slyšitelnosti	

Tabulka 1: Hladiny akustického tlaku v různém prostředí a jejich vliv na člověka [6]

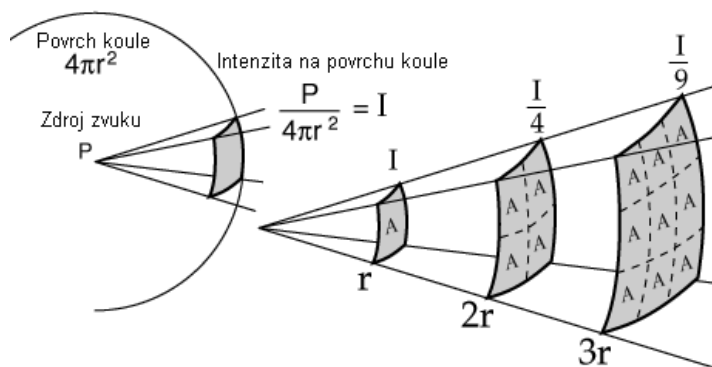
1.2.2 Intenzita zvuku

Poněvadž je akustický tlak veličina, jež je silně závislá na akustických podmínkách a vzdálenosti od zdroje, byla lordem Rayleighem (*The Theory of Sound*, 1877) zavedena veličina intenzita zvuku, ze které lze určit, jak velký hluk zdroj produkuje. Nejen proto dnes intenzitní metody pomalu nahrazují metody založené na měření akustického tlaku a jsou aplikovatelné např. při měření akustického výkonu, lokalizaci zdrojů zvuku, měření pohltivosti materiálu atd.

Akustická intenzita I je vektorová veličina, s jejíž pomocí lze popsat i směr šíření zvuku. Intenzita je rovněž vztažena na plochu a je přímo úměrná energii kmitání, kterou vlnění v tomto místě vzbuzuje. Přesněji je dána množstvím akustické energie, která projde za 1 s plochou 1 m^2 kolmou ke směru šíření vlnění, a má tudíž rozměr $[\text{W/m}^2]$. Energie je pak závislá na druhé mocnině frekvence a druhé mocnině amplitudy výchylky, proto je intenzita zvuku určena nejen změnami tlaku vzduchu, ale rovněž výškou tónu.[6] Mezi akustickým výkonem a intenzitou zvuku platí následující vztah (1.3).

$$P = \int_S \vec{I} \cdot d\vec{S} \quad (1.3)$$

Průběh intenzity zvuku při šíření sférické zvukové vlny od bodového zdroje a její závislost na prostupující ploše vystihuje následující obrázek (Obr. 1.4)



Obr. 1.3: Intenzita zvuku při šíření sférické zvukové vlny

Hladina intenzity zvuku představuje poměr relativní intenzity zvuku a referenční hodnotu intenzity pro práh slyšení, což je ($I_0 = 1 \cdot 10^{-12} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ pro frekvenci 1 kHz). Druhou hranicí může být pro člověka práh bolesti, charakterizovaný intenzitou zvuku $1 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$, což odpovídá akustickému tlaku 130 Pa. Obecný vztah pro výpočet hladiny zvukové intenzity je dán následující rovnicí (1.4).

$$L_I = 10 \log\left(\frac{I}{I_0}\right) \quad (1.4)$$

Jednotka hladiny intenzity je taktéž v logaritmické škále z důvodu značného rozsahu slyšení. Z analogie vztahů pro výpočet hladin akustického tlaku L_p a intenzity zvuku je patrné, že mezi těmito veličinami existuje určitá závislost. Při běžných klimatických podmínkách lze tuto závislost vyjádřit vzorcem (1.5).

$$L_I = L_p - 0,2 \cong L_p \quad (1.5)$$

Tento vztah umožňuje na základě měření SPL přímo určit hladinu intenzity zvuku, čímž má pro nás velký význam v technické akustice, kde můžeme rozdíl 0,2 dB zanedbat. [1]

1.3 Zvuková pole

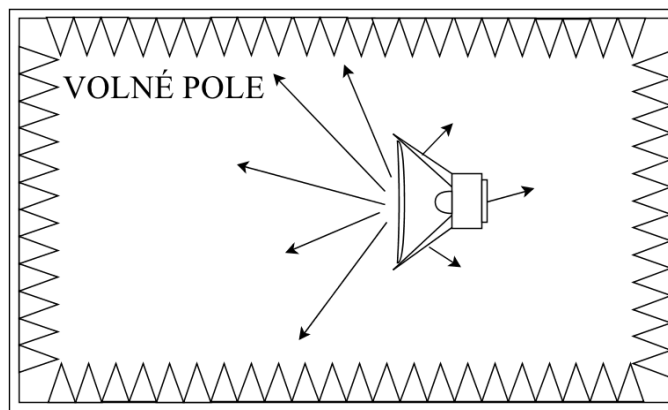
Oblast, kterou se šíří zvuk, je nazývána zvukové pole. Rozlišujeme dva základní případy prostorů, pro něž můžeme charakterizovat jejich vzájemný vztah, a to pole volné a difuzní.

1.3.1 Volné akustické pole

V tomto poli se zvuk šíří všemi směry a nedochází zde k odrazům vln, tudíž vylučujeme možnost jejich interferencí. Proto je platnost všech předešlých vztahů omezena pouze na šíření zvuku v tomto poli. Mezi intenzitou a akustickým tlakem existuje následující vztah (1.6).

$$|I| = \frac{P_{RMS}^2}{\rho c} \quad (1.6)$$

Typickou charakteristikou volného pole je pokles akustického tlaku i úrovně intenzity vždy o 6 dB při každém zdvojnásobení vzdálenosti od zvukového zdroje. Příkladem takového pole může být v praxi např. bezodrazová místnost, ve které dochází k úplné absorpci zvuku stěnami, nebo také zvukový zdroj vysoko nad zemským povrchem.

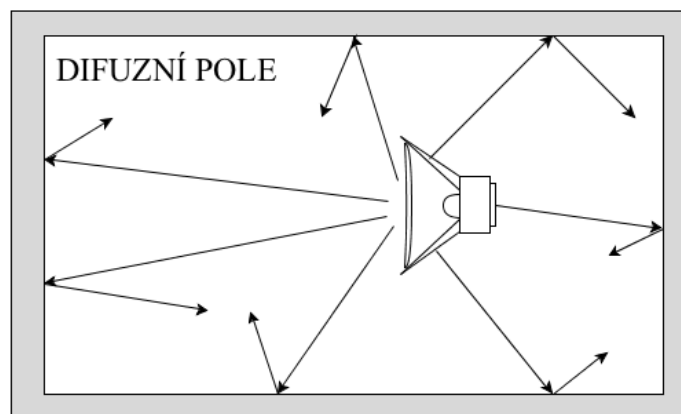


Obr. 1.4: Zdroj zvuku ve volném poli

1.3.2 Difuzní pole

V uzavřených prostorech se díky překrývání primárních a sekundárních vln vytváří akustické pole odražených vln, v němž nelze určit směr šíření energie zvukové vlny. Teoretický vztah mezi složkou intenzity I_x a tlakem je definován takto

$$I_x = \frac{P_{RMS}^2}{4\rho \cdot c} \quad (1.7)$$



Obr. 1.5: Zdroj zvuku v difuzním poli

Na základě vzdálenosti od rovnoměrného zvukového zdroje můžeme dále definovat pole blízké (Fresnellův prostor) nebo pole vzdálené. Někdy se ve vzdáleném poli uzavřeného prostoru definuje ještě pole dozvukové, kde se uplatňují odražené vlny. [6]

Při měření se vždy snažíme docílit toho, abychom byli v dostatečné vzdálenosti od zdroje, tzn. nebyli v poli blízkém a také abychom se vyhnuli nežádoucím dozvukům. Toho dosáhneme, budeme-li měřit v poli volném nebo v bezodrazové místnosti, která se svými absorpčními vlastnostmi blíží volnému poli.[1]

2 Elektroakustické měniče - reproduktory

Zařízení, která v elektroakustice uskutečňují konverzi signálových veličin jednoho druhu na veličiny jiného druhu, nazýváme měniče. Nejčastěji se můžeme setkat s měniči elektroakustickými, v nichž dochází k přeměně elektrického napětí a proudu na akustický tlak a objemovou rychlost a naopak. Tyto elektroakustické měniče jsou nazývány reproduktory, protože u nich dochází k reprodukci zvuku ze vstupního signálu.

2.1 Základní rozdělení měničů

Měniče dělíme zpravidla podle více kritérií. Nejčastěji jsou používány elektroakustické a elektromechanické měniče, které řadíme do dvou skupin. První skupinu tvoří měniče s magnetickým polem, kde řadíme měniče elektrodynamické, elektromagnetické a magnetostrikční. Do druhé skupiny, zahrnující měniče s elektrickým polem, pak patří měniče elektrostatické a piezoelektrické. Měniče, pracující na principu elektro-akustické konverze, jsou základními součástmi elektroakustických vysílačů - reproduktorů, které dělíme dle následujících hledisek. [7]

2.1.1 Podle frekvenčního rozsahu

Na základě toho, pro jaké kmitočtové pásmo je reproduktor zkonstruován, se reproduktory dělí do čtyř kategorií. Do první patří tzv. širokopásmové reproduktory, které jsou schopny reprodukce téměř v celém rozsahu slyšitelného frekvenčního pásma (55 Hz-13,5 kHz). Některé speciální širokopásmové reproduktory dokážou pokrýt i celé akustické spektrum (20 Hz-20 kHz). Tyto typy mají velmi široké použití např. aplikací do studiových monitorů, velkých ozvučovacích soustav (P.A.) apod.

Další skupinou jsou tzv. reproduktory hlubokotónové (basové), vyvinuty pro reprodukci nízkých kmitočtů cca do 500 Hz. Třetí skupinu tvoří reproduktory středopásmové, jejichž úkolem je reprodukce středního kmitočtového pásma (500-4000 Hz). Poslední skupinu zaujímají pochopitelně reproduktory vysoko-tónové (výškové), pracující ve vyšší frekvenční oblasti (nad 3 kHz). Jejich nevýhodou se však stává vysoká směrovost vyzařování.[8]



Obr 2.1: Typy reproduktorů dle frekvenčního pásma (širokopásmový, basový, středopásmový, vysokopásmový)

2.1.2 Podle principu činnosti

Reproduktory dělíme jednak podle způsobu vyzařování a následně na základě principu funkčnosti jejich aktivních částí. První skupinou jsou reproduktory přímo-vyzařující s účinností mezi 1-2 %. Patří zde konstrukční systémy: elektromagnetické, elektrostatické, piezoelektrické, plazmové a kondenzátorové. Do druhé skupiny nepřímo-vyzařujících neboli tlakových reproduktorů s účinností 10-15 % patří systémy elektrodynamické. [8]

Elektromagnetický systém reproduktoru využívá silového působení na kmitací cívku, která je umístěna v silném magnetickém poli. Takto vzniklá síla je poté přenášena na membránu, jež svým kmitáním způsobuje pohyb okolního vzduchu s následnými změnami tlaku. Tento konstrukční systém s kuželovou či kalotovou membránou patří v konstrukci reprobeden mezi nejpoužívanější. U systému elektrostatického je síla potřebná pro rozkmitání membrány generována jako silové působení dvou elektrod. Co se piezoelektrických systému týče, jejich podstata spočívá v působení napětí na piezoelektrický krystal, který mění svou velikost v závislosti na polaritě elektrického napětí. [9]

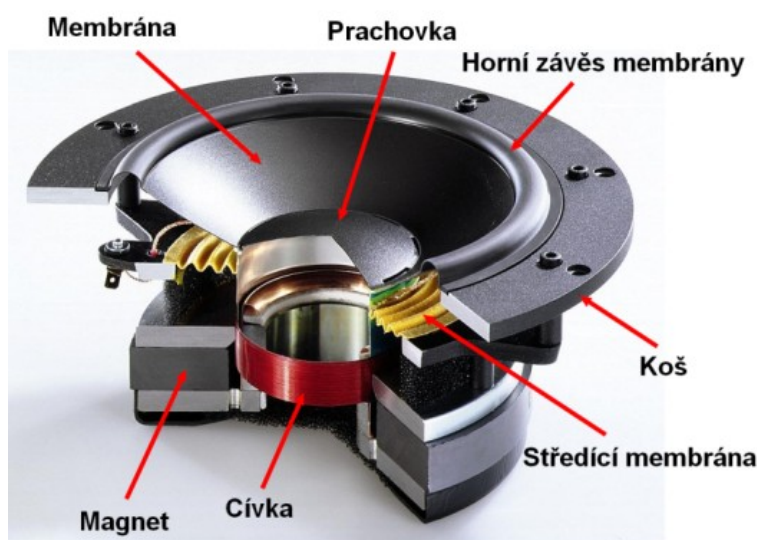
2.1.3 Podle způsobu užití

Podle požadavků na jejich charakteristiky je dělíme opět do několika skupin. Hifi reproduktory, od kterých se vyžaduje malá úroveň zkreslení. Profesionální ozvučovací systémy, kde jsou zapotřebí velké příkony a velká citlivost. Reproduktory pro plošné ozvučení, u nichž je kladen velký důraz na srozumitelnost řečového pásma a jejich frekvenční charakteristika by měla být jen málo zvlněná (více kapitola 3.1). Poslední skupinou jsou reproduktory speciální, mezi něž patří např. reproduktory do bazénu.

2.2 Konstrukce reproduktorů

Při popisu se zaměříme hlavně na první konstrukční skupinu přímovyzářujících reproduktorů, u kterých membrána sousedí bezprostředně s akustickým prostředím-vzduchem a je jim také do určité míry zatěžována.

Rozeberme si tedy stěžejní části elektroakustického měniče [8], které jsou vyznačeny na následujícím obrázku (Obr. 2.2):



Obr 2.2: Řez elektromagnetickým reproduktorem

- Koš reproduktoru, tvořící nosnou část reproduktoru. Na jeho obvodu je zevnitř uchycena membrána a v jeho zúžené části dále připevněn magnetický obvod. Nejčastěji je to plechový výlisek nebo odlitek z hliníku či plastu.
- Magnetický obvod, jehož základem je permanentní magnet a pólové nástavce soustřeďuje magnetickou energii do pracovní mezery, kde se pohybuje kmitací cívka. Magnet je vyroben z magnetických slitin či magneticky tvrdých feritů.
- Kmitací cívka je spolu s magnetickým obvodem považována za hnací ústrojí reproduktoru. Cívka je přímo spojena s membránou. Tato součást reproduktoru má vliv na jeho frekvenční charakteristiku, která nás bude dále v měření zajímat. Její rozkmit může být také původem zkreslení výstupního signálu. Technologie její výroby je ze všech komponent nejsložitější.
- Membrána reproduktoru přenáší pístovým (axiálním) pohybem akustickou energii do okolí, čímž vyvolává změny tlaku vzduchu a vzniká tak zvuk. Nejčastěji se můžeme setkat s membránou ve tvaru kužele s kruhovou nebo eliptickou

základnou.[10] Membrána není tuhá, takže během jejího pohybu může docházet k deformacím a vzniku vlastních kmitů, což se také neblaze projeví zejména na její impedanční a frekvenční charakteristice.

- e) Středící membrána z textilie nebo plastu zabraňuje tření cívky o části magnetického obvodu tím, že přidržuje kmitací cívku s membránou v ose vzduchové mezery magnetu.
- f) Horní závěs membrány spolu se spodním závěsem (středící membránou) tvoří její pružné ukotvení. Tyto závěsy spolu s membránou udávají poddajnost, odpor a hmotnost celého kmitacího systému a tudíž mají zásadní vliv na parametry reproduktoru.

2.3 Parametry reproduktoru

Na základě příslušných kritérií rozdělujeme parametry reproduktorů do několika kategorií, počínaje všeobecnými vlastnostmi (frekvenční rozsah, citlivost, jmenovitá impedance atd), přes "Thiele-Small" parametry, jež popisují jeho mechanicko-elektrické vlastnosti (rezonanční frekvence, činitele jakosti atd.), dále grafické vlastnosti (směrové charakteristiky atd.) a mechanickými vlastnostmi (hmotnost, rozměry) konče.

2.4 Reproduktorové systémy

V následujícím textu, potažmo v praktické části této bakalářské práce, nás však nebudou zajímat pouze charakteristiky reproduktoru jako takového, nýbrž především přenosové vlastnosti celého reproduktorového systému.

V praxi se zřídka setkáme s užitím samostatných reproduktorů, až na speciální případy v automobilovém průmyslu, kde se reproduktory montují přímo do palubních desek či dveřních systémů aut. V drtivé většině ostatních případů se reproduktory usazují do tzv. ozvučnic, které spolu s dalšími podpůrnými prvky (aktivní, pasivní výhybky) a zesilovači tvoří reproduktorové systémy. Ozvučnice neboli reproduktorová skříně ve své podstatě slouží k oddělení přední a zadní zvukové vlny z reproduktoru. Nedochází tak k jevu nazývanému akustický zkrat, kdy se tyto dvě vlny na určitých frekvencích vzájemně vyruší. Hlavní přínos této skříně je patrný především v podpoře reprodukce nižších kmitočtů, ale částečně slouží také jako ochrana pro basový reproduktor, jelikož u něj díky použití ozvučnice nedochází k tak velké výchylce. Typů, tvarů a materiálů, které se pro

tyto ozvučnice používají, je velké množství, a jejich popis by přesahoval rozsah této práce, proto se nadále budeme věnovat spíše důsledkům z této konstrukce plynoucí, které, ať už přímo či nepřímo, ovlivňují výstupní charakteristiky těchto soustav.



Obr. 2.1: Studiové monitory KRK Rosada RP10-3 [11]

3 Charakteristiky reproduktorových systémů

Cílem všech designérů, výpočtářů a konstruktérů profesionálních reproduktorových soustav je sestavit takové akustické zařízení, které by bylo schopné tzv. věrné reprodukce. Tento pojem lze definovat jako dosažení identického sluchového vjemu při poslechu vstupního signálu a zároveň pak i při poslechu signálu výstupního. V běžném životě by to tak například mohlo znamenat rovnocennost živého vystoupení a reprodukované nahrávky. V technické praxi je toto bohužel utopií, jelikož dosažení takového stavu je v podstatě fyzikálně, a tak i technicky nemožné. Jsme tedy schopni jen pomocí sluchu rozeznat, zda hudebník hraje přímo před námi nebo se jím nahraná hudba šíří z reproduktorů.

Na výše zmíněné ztrátě věrnosti reprodukovaného signálu se podílí spousta atributů. Ať už to jsou již dříve popsány materiálové vlastnosti membrány reproduktoru (tuhost, poddajnost) a její vlastní kmity nebo také akustické vlastnosti použité ozvučnice. Dále tento elektroakustický řetězec svým zkreslením zatěžuje také použitý zesilovač.

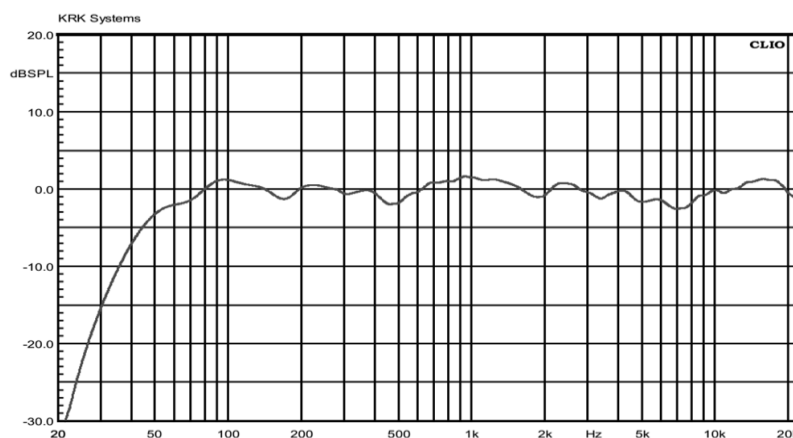
Z těchto důvodů jsou všechny reproduktorové systémy zatíženy určitou mírou zkreslení výstupního signálu, což se podepíše na kvalitě výsledného akustického vjemu, která je pro koncové uživatele těchto produktů zásadní. Jak velká je míra tohoto zkreslení lze zjistit sofistikovaným měřením různých přenosových charakteristik reproduktorových systémů, což bude našim úkolem v následujících kapitolách.

3.1 Frekvenční přenosová funkce

Frekvenční přenosová funkce (dále jen FRF), mnohdy také označována jako frekvenční charakteristika, je bezesporu jedním z nejdůležitějších objektivních fyzikálních údajů pro většinu akustických zdrojů, které působí jako přenosová soustava. Mluvíme-li o funkci frekvenční odezvy systému, jak je také někdy FRF nazývána, můžeme již ze samotného názvu odhadnout, o čem tato funkce vypovídá.

Frekvenčních přenosových charakteristik existuje více druhů. Nejčastěji se můžeme setkat s amplitudovou frekvenční charakteristikou, u které se ve své podstatě jedná o grafické znázornění funkční závislosti charakteristické citlivosti na budicí frekvenci v logaritmickém měřítku. Tato charakteristika se používá nejen pro popis akustických zdrojů, ale také pro stanovení parametrů různých technických zařízení, kterými mohou být zesilovače, předzesilovače či CD přehrávače. Ojediněle se můžeme setkat i s popisem přenosových charakteristik prostoru pomocí FRF.

Předmětem této bakalářské práce bylo především využití frekvenční přenosové funkce pro deklaraci vlastností reproduktorových systémů, kde je považována za jeden z určujících parametrů kvality daného elektroakustického zařízení. Při interpretaci tohoto parametru se můžeme však setkat i s neblaze proslulým klamáním potencionálních zákazníků reproduktorových soustav, kdy výrobce záměrně udává tuto charakteristiku v grafu s nadměrnou šířkou škály ve směru osy Y. Tento fakt spolu s použitím logaritmické stupnice svislé osy zapříčiní, že se výsledná frekvenční charakteristika zdánlivě vyhladí. Znamená to, že nejsou patrný všechny frekvenční propady a produkt se může navenek jevit kvalitnější, než ve skutečnosti je. Poměr jednotlivých os je však stanoven normou. [19]

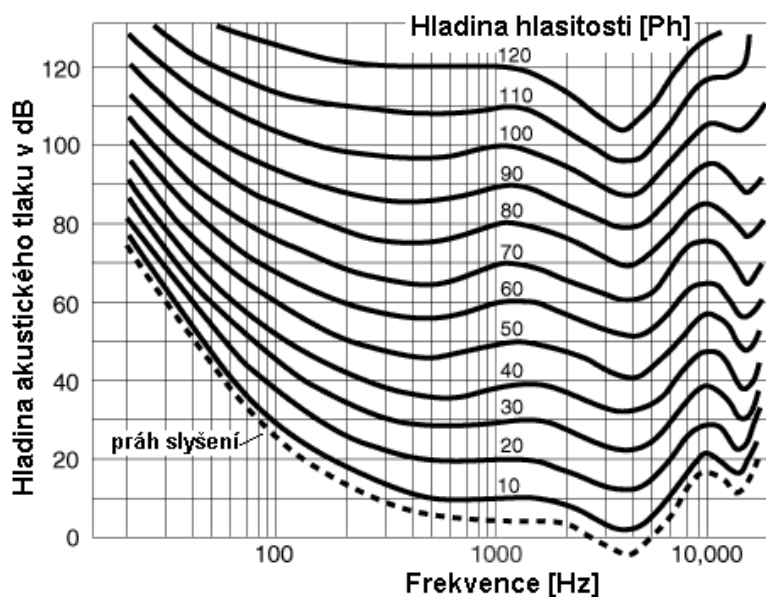


Obr. 3.1: Frekvenční odezva studiových monitorů KRK VXT8 [11]

Na výše uvedeném obrázku (Obr.3.1) je znázorněna typická prezentace FRF v grafu, konkrétně se jedná o frekvenční přenosovou funkci studiových monitorů (americké značky KRK Systems), které jsou obecně určeny pro referenční porovnávání záznamů v nahrávacích studiích. S ohledem na jejich primární využití musí být konstruovány tak, aby poskytovaly co možná nejvěrnější reprodukci, což také znamená snahu o co nejvíce vyrovnaný průběh frekvenční charakteristiky.

Ideální situace při popisu FRF by samozřejmě nastala, kdyby popisovaná charakteristika byla konstantního průběhu a na grafu by se jevila jako přímka rovnoběžná s podélnou osou. FRF by pak měla plochý a hladký průběh. To by znamenalo, že celá reproduktorová soustava je lineární s nulovou mírou zkreslení. Na základě paradigmat elektroakustiky je však jasné, že této situace nelze v technické praxi dosáhnout.

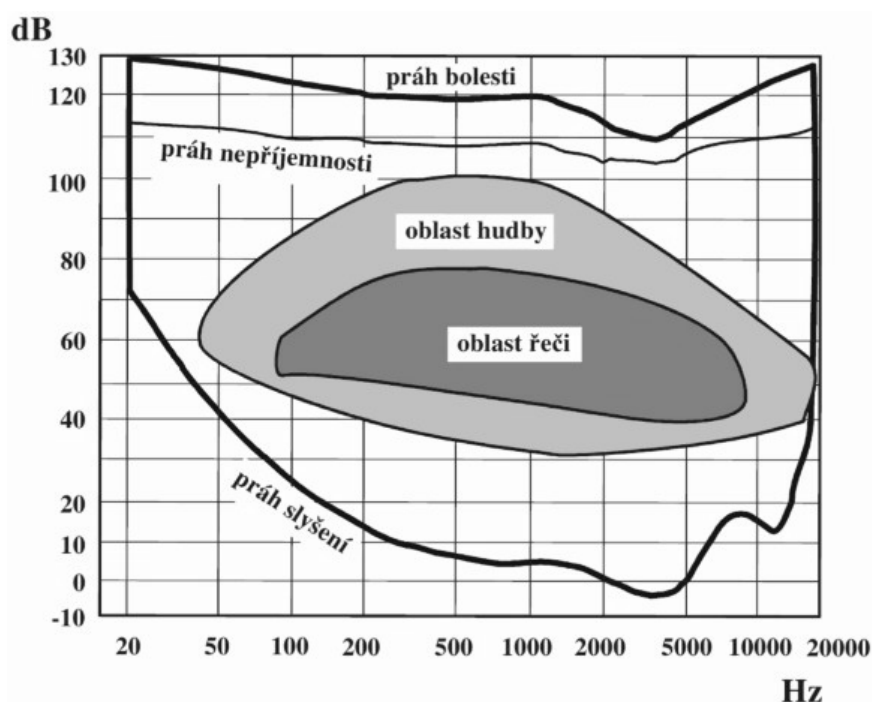
Na straně druhé je lidský sluchový orgán, který je také ve své podstatě nelineárním přijímačem, jehož frekvenční vnímavost a senzitivitu bychom při zjišťování FRF reproduktorových soustav neměli opomenout, jelikož tyto soustavy slouží především pro naše smyslové vnímání, potažmo sluch. Není však účelem této práce zabývat se psychoakustikou člověka a jeho zvukovou percepcí, jelikož je tato oblast samostatnou a velmi rozsáhlou problematikou akustické vědní sféry. Nicméně si můžeme alespoň okrajově přiblížit onu nelinearitu lidského ucha, kterou výstižně popisují tzv. křivky konstantní hlasitosti, jež jsou vlastně spojnicemi signálů jednotlivých frekvencí vnímanými se stejnou hlasitostí.[12] Jejich průběh je znázorněn na následujícím obrázku. (Obr. 3.2)



Obr. 3.2: Křivky konstantní hlasitosti [12]

Tato závislost je výsledkem četných experimentů jednotlivých badatelů, kteří se danou problematikou zabývali, a jejich konsensus je mezinárodně normován. Křivky stejné hlasitosti vypovídají o závislosti hlasitosti čistých tónů na frekvenci. Tato skutečnost je dle Weber-Fechnerova fyziologického zákona definována následovně: roste-li hlasitost daného tónu řadou aritmetickou, roste jeho fyzikální intenzita řadou geometrickou.[1] Referenční tón, pro který jsou stanoveny v předchozím grafu hodnoty hladin akustického tlaku, má kmitočet 1 000 Hz.

Pro vysvětlení frekvenčního rozsahu, který se nejčastěji při měření FRF používá, je nutno zmínit ještě skutečnost, že kmitočtový rozsah slyšení člověka je poměrně úzký na rozdíl od některých jiných živočichů, kteří ke komunikaci využívají např. i ultrazvukové pásmo. Rozsah slyšení zdravého mladého člověka se udává od v rozmezí 20 Hz-20 kHz a s přibývajícím věkem a sluchovou degradací se horní kmitočtová hranice ještě snižuje.[8] Jednotlivé člověkem slyšitelné oblasti, v závislosti na hladině intenzity zvuku a kmitočtu, jsou znázorněny na následujícím schématu (Obr. 3.3).



Obr. 3.3: Rozsah slyšení u zdravého mladého člověka [8]

Na základě předchozích opodstatnění se FRF pro elektroakustické měniče odměřují a vyznačují do potřebných grafů převážně ve slyšitelném pásmu člověka.

3.1.1 Pravidla pro měření frekvenční přenosové funkce

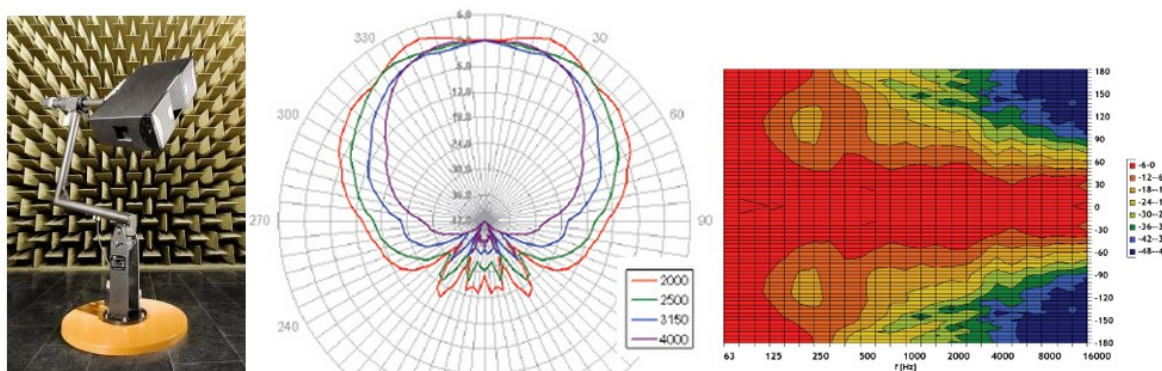
Při měření FRF bývá vhodné neomezit se pouze na měření této funkce v referenční ose reproduktoru, ale doporučuje se do protokolu zanechat výsledky z měření i pro mimoosé pozice (např. 30°, 60° od referenční osy). Tímto dalším měřením tak získáme alespoň přibližnou představu o směrovosti reproduktoru. Při požadavcích na profesionální výstupní data z měření musíme dále ověřit i dozvukové podmínky akustického prostředí, ve kterém reproduktorové soustavy měříme. Jelikož pro potřeby této práce nemáme k dispozici bezodrazovou místnost, nýbrž místnost polobezodrazovou, tento aspekt se v měření projeví.

Někdy je ovšem výhodné měřit reproduktorové soustavy přímo v reálné místnosti, kde nejčastěji bývají tyto soustavy umístěny. Soustava se pak měří ve 3 pozicích dané oblasti a data z nich se průměrují. V souvislosti s tímto měřením se také musí určit frekvenční charakteristika místnosti, která se poté s naměřenými charakteristikami reproduktoru superponuje. Je zřejmé, že odrazy a stojaté vlnění v místnosti způsobí velké fluktuace na nízkých frekvencích, které výsledky FRF v této oblasti výrazně zkreslí, ačkoliv v pásmu zhruba od 400 Hz se výsledné křivky ze 3 měřicích pozic stávají téměř totožnými. Jakmile je však reproduktor umístěn do místnosti, neexistuje žádný způsob, který by s vysokým měřicím rozlišením a přesností umožnil rozpoznat přímý, včasně-odražený a pozdně-odražený zvuk.[13] Tato práce však bude zahrnovat pouze měření v polobezodrazové místnosti, kdy se za použití různých měřicích postupů budeme snažit eliminovat projevy vln odražených od podlahy, které by mohly ovlivnit výslednou FRF.

3.2 Směrová charakteristika, index směrovosti

Dalším velmi významným parametrem v oblasti akustických měření je směrová charakteristika, která by spolu s FRF měla být uvedena v popisu každého elektroakustického měniče. U reproduktorových systémů bývá nazývána také charakteristikou vyzařovací a u měničů reciprokých - mikrofonů - se pak nazývá směrová citlivostní charakteristika. Směrová charakteristika popisuje funkční závislost charakteristické citlivosti na úhlu od referenční osy vyzařování reproduktoru. Pro její vykreslení se výhradně používá poláních souřadnic, kdy se vykresluje obvykle více křivek pro různé frekvence. Někdy se může zjednodušeně vyjádřit pouze úhlem ve stupních pro horizontální a vertikální rovinu. Měření této charakteristiky se provádí buďto otáčením reproduktoru okolo stojícího snímače (mikrofonu), nebo obráceným způsobem.

Důležitý je vztah směrové charakteristiky a vyzařované frekvence, kdy platí tvrzení, že s rostoucím kmitočtem následně roste i index směrovosti, což pro nás z praktického hlediska znamená větší zvlnění (odchylka od kruhové charakteristiky) směrové charakteristiky při vyšší frekvencích. U reproduktorových systémů určených pro poslech v místnostech či ve studiích je požadován malý index směrovosti, aby se zamezilo přílišnému odrazu vln od zdí. Naopak u profesionálního ozvučování veřejných prostranství je příhodná velká směrovost, aby byl přenesený akustický tlak do bočních směrů minimální a aby se vyzařovaný výkon omezil převážně do směru hlavního.[8]



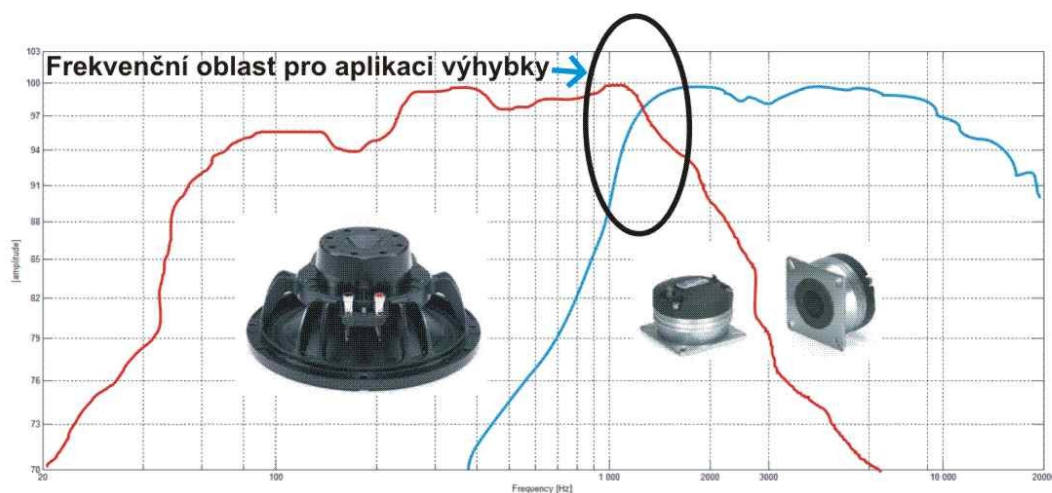
Obr. 3.4: Profesionální způsob měření indexu směrovosti v bezodrazových komorách, příklad směrové charakteristiky reproduktoru v polárních souřadnicích a ve 2D izobarickém znázornění

3.3 Dělicí kmitočty

Při návrhu a simulacích reproduktorových soustav se i zkušený konstruktér poměrně často dostává do situací, kdy musí řešit otázku tzv. dělicích kmitočtů. V minulé kapitole 3.1 již bylo nastíněno, jak by se měla ideální reproduktorová soustava chovat, co se FRF týče. Byla ovšem zmíněna i skutečnost, že naprosto přesnou soustavu, jež by vykazovala nulovou míru zkreslení výstupního signálu, vyrobit nelze.

Zavrhne-li myšlenku použití jen jediného reproduktoru, který, byť může být deklarován jako široko-frekvenční, není schopný spolehlivě a věrně pokrýt celé slyšitelné kmitočtové pásmo, musíme zvolit variantu jinou. Tahle alternativní varianta stavby reproduktorů se jeví jako mnohem efektivnější a spočívá v umístění dvou, popřípadě tří nezávislých reproduktorů do jedné ozvučnice, přičemž každý z těchto měničů vyzařuje signál pouze v rámci své, předem určené, frekvenční oblasti. Efektivita této metody tkví především v různém provedení jednotlivých reproduktorů, přičemž ty nízkofrekvenční bývají pochopitelně většího průměru než reproduktory vysokofrekvenční, a rovněž může být použito i jiného typu elektroakustického měniče.

Abychom jednotlivým reproduktorům přiřadili jejich pracovní frekvenční pásma, v nichž je dle výrobce jejich projev frekvenčně vyrovnaný, musíme k tomu použít komponentu zvanou výhybka. Tato součást sestává z řady paralelně či sériově zapojených rezistorů a kondenzátorů tak, aby propustila jen požadované kmitočty a ty zbylé odfiltrovala. Výhybky jsou charakterizovány svou dolní a horní propustí, která stanovuje požadované frekvenční hranice, ale také svou strmostí, která determinuje spád jejich filtru. Výhybky jsou konstruovány jak pasivního, tak rovněž aktivního typu.



Obr. 3.5: Frekvenční rozsah měřených reproduktorů a předpokládaná oblast použití výhybky

Právě v těchto hraničících frekvencích dochází u mnoha reproduktorových systémů k jistým nepřesnostem v jejich projevu, které jsou způsobeny grafickým propadem ve FRF. Tyto propady ve frekvenční charakteristice si můžeme představit jako hluchá místa reproduktorové soustavy, kde dochází k poklesu akustického tlaku zapříčiněného špatně nakonfigurovanými parametry výhybky. V podstatě dojde k jevu, kdy jednu frekvenční složku můžou hrát najednou oba reproduktory v jedné ozvučnici, přičemž tyto signály o stejné frekvenci mohou mít různou fázi, což superpozicí obou vln v konečném důsledku vyústí v pokles akustického tlaku.

3.4 Frekvenční rozsah

Frekvenční rozsah udává, v jakém kmitočtovém pásmu je daná reproduktorová soustava schopna reprodukce, tzn. vyzařování akustického signálu do svého okolí. Nejčastěji se pro tento parametr uvádí hodnota 20 Hz-20 kHz, což je rozsah slyšení zdravého mladého člověka, jak již bylo dříve popsáno v kapitole 3.1.

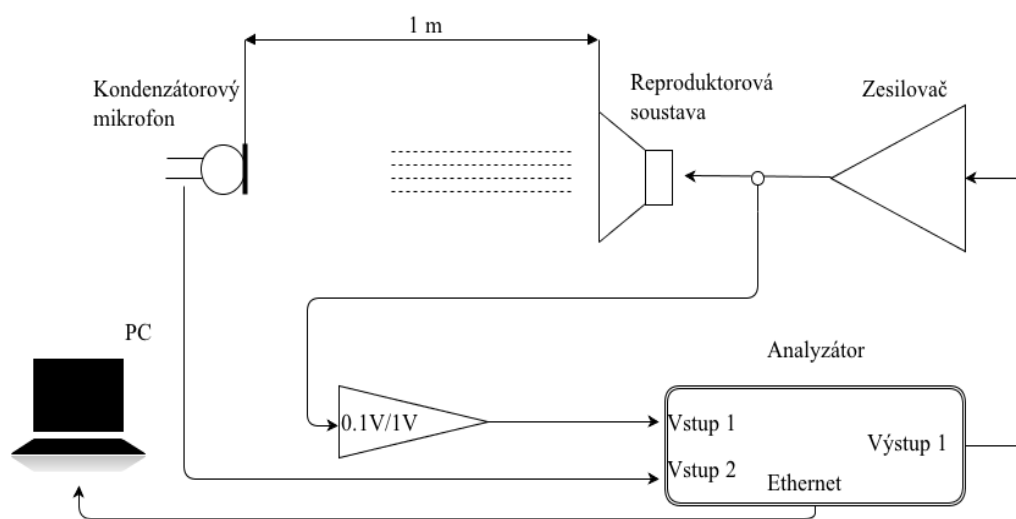
4 Návrh měřicí metody

Při měření přenosových vlastností reproduktorových soustav se běžně využívá více metod a přístupů. Volba dané metody závisí především na požadované přesnosti výsledků, od čehož se odvíjí i další předpoklady.

Pro orientační měření charakteristik postačí nadšencům, jež si reproduktorové soustavy vyrábějí v amatérských podmínkách, i jejich PC s externí zvukovou kartou a potřebným softwarem. Při odměřování přenosových charakteristik přímo výrobcem jsou kladeny pochopitelně vysoké nároky na přesnost výstupních dat a zároveň musí veškerá metodika a značení odpovídat technickým normám daného státu. [9] Pro účely měření byla k dispozici výzkumná experimentální hluková laboratoř VŠB-TUO, spolu s jejím veškerým technickým vybavením, čítajícím špičkové měřicí mikrofony, zesilovače a analyzátory.

4.1 Návrh měřicího řetězce

Pro laboratorní měření frekvenční přenosové funkce byl navržen měřicí řetězec, který ilustruje následující schéma (Obr. 4.1).



Obr. 4.1: Schéma měření FRF a amplitudové frekvenční charakteristiky reproduktorové soustavy

Měřicí řetězec pro všechny dále použité metody vychází vždy z tohoto schématu, přičemž sekvence jednotlivých kroků v něm je následující.

Analyzátor, sloužící zároveň i jako generátor je zdrojem signálu pro zesilovač, kde dojde k jeho lineárnímu zesílení. Následně je tento napěťový signál přiveden do reproduktorové soustavy, v níž je pomocí elektroakustických měničů převeden na signál akustický - zvukovou vlnu. Ta se šíří akustickým prostředím, v našem případě vzduchem, na vzdálenost jednoho metru, kde je umístěn elektroakustický měnič - kondenzátorový mikrofon. Ten převede akustický signál zpět na elektrický, který je dále veden koaxiálním kabelem zpět na začátek řetězce, tj. do analyzátoru. Zde se nachází analogově digitální převodník, který umožňuje s naměřenými daty dále pracovat. Konečně jsou tato data v digitální podobě přenesena ethernetovým kabelem (LAN rozhraním) do PC, kde dochází k jejich finálnímu zpracování a vyhodnocení naměřených výsledků (angl. post-processing).

4.1.1 Analyzátor

Pro účely měření v rámci této bakalářské práce byl zvolen přenosný analyzátor PULSE typ 3560-C firmy Brüel & Kjær. Jedná se o 4kanálovou jednotku pro sběr dat, která je určena k vysoce profesionálnímu měření akustických či vibračních veličin. Výhodou tohoto analyzátoru je také vestavěná technologie TEDS, sloužící k automatickému rozpoznání připojených snímačů a následnému načtení potřebných parametrů.



Obr. 4.2: Signálový analyzátor PULSE firmy Brüel & Kjær - typ 3560 C [14]

Analyzátor jako takový žádné ovládací prvky neobsahuje, proto je nutné připojení obslužného PC se softwarem LabShop Pulse firmy B&K, ve kterém lze provést nastavení analyzátoru spolu se zaznamenáním a vyhodnocením naměřených dat. Technické údaje analyzátoru [14] jsou uvedeny v následující tabulce (Tabulka 1).

Počet vstupů	4
Počet výstupů generátoru	2
Vzorkovací frekvence	65 536 Hz
Frekvenční rozsah měření	50 Hz – 25,6 kHz
Rozlišení	16 bitů

Tabulka 2: Základní parametry analyzátoru PULSE 3560-C [14]

4.1.2 Mikrofon

K měření hladiny akustického tlaku byl vybrán 1/2" kondenzátorový, všesměrový mikrofon firmy B&K typu 4189-A-021, který je určen k měření ve volném poli. Tento profesionální mikrofon je rovněž opatřen technologií automatické identifikace TEDS, čímž je plně kompatibilní s naším analyzátozem. Vzájemné propojení těchto dvou komponent je uskutečněno koaxiálním kabelem opatřeným BNC konektory.



Obr. 4.3: Měřicí mikrofon B&K typu 4189 [14]

Měřicí mikrofon byl umístěn v referenční ose 10" středobasového reproduktoru, potažmo naproti zvoleného akustického středu zdroje, jak vyžaduje norma. [15] Mikrofon byl před samotným měřením kalibrován akustickým kalibrátorem B&K typu 4230 o třídě přesnosti 1. Ukázka kalibrační křivky je uvedena v přílohách (Příloha C). Výhodou tohoto mikrofonu je také to, že je prepolarizovaný, tzn. že piezoelektrický krystal, který je v něm umístěn, nepotřebuje ke své funkci žádné přídavné napájení, jelikož je vyroben z permanentně nabitého či polarizovaného materiálu. Vybrané technické parametry měřicího mikrofonu [14] jsou shrnuty v následující tabulce (Tabulka 3).

Citlivost	50 mV/Pa
Frekvenční rozsah	20 Hz ÷ 20 kHz
Dynamický rozsah	14,6 ÷ 138 dB
Teplotní rozsah	-20 ÷ +80°C
Nelinearita	±2 dB

Tabulka 3: Základní parametry mikrofonu [14]

4.1.3 Zesilovač

K zesílení generovaného signálu jsme měli k dispozici zesilovač korejské firmy TIRA typu BAA 60 (Obr. 4.4). Tento univerzální jednokanálový lineární zesilovač je určen pro laboratorní účely zejména k zesilování vibračních budičů nebo generovaných akustických signálů. Na čelní straně je vybaven digitálním ukazatelem výstupního proudu a napětí. Na straně zadní se pak nachází analogový vývod interního voltmetru, který jsme využili pro přímé propojení s analyzátozem pomocí koaxiálního kabelu opatřeného BNC konektory. Tohoto spojení mezi zesilovačem a analyzátozem bylo zapotřebí pro zaznamenání průběhu vstupního signálu, který se nadále využíval k získání FRF pomocí impulzní odezvy, jak je dále popsáno v kapitole 5.4.



Obr. 4.4: Lineární zesilovač TIRA BAA 60 [16]

Max. výstupní výkon	60 VA
Frekvenční rozsah	DC ÷ 20 kHz
Max. výstupní napětí	16 V
Max. výstupní proud	3,9 A
Harmonické zkreslení	< 0,1 %

Tabulka 4: Vybrané parametry zesilovače TIRA BAA 60 [16]

4.1.4 Reproduktorová soustava

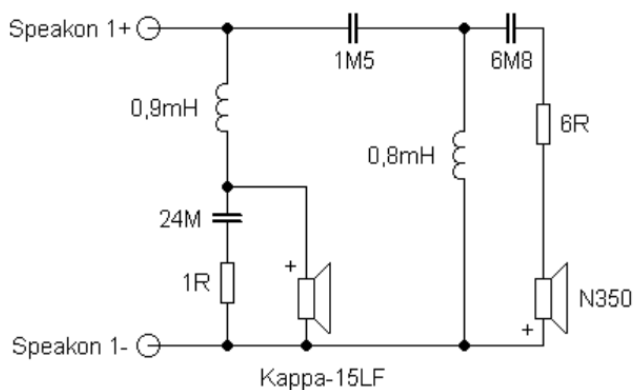
Pro výchozí řadu měření, na kterých budou popsány základní metody měření FRF, byla měřeným reproduktorovým systémem zvolena reproduktorová sestava "Pro Constructor series - Club 10", jež byla zkonstruována dle volně dostupného návrhu uvedeného na internetových stránkách distributora Prodance. [17]

Blíže se jedná o dvoupásmovou reproduktorovou soustavu, která je osazena dvěma oddělenými reproduktory. Konkrétně jedním 10" středo-basovým reproduktorem značky B&C Speakers, typu 10NW64, jehož katalogový list je uveden v příloze (Příloha A). Druhý reproduktor je 1" výškový reproduktor (angl. driver) firmy RCF typu ND1411-M (katalogový list - Příloha B), který byl vsazen do 1" zvukovodu RCF HF 101. Všechny zmíněné komponenty jsou v totožném pořadí zobrazeny níže (Obr. 4.6).



Obr. 4.5: B&C Speakers 10NW64; RCF ND1411-M; RCF HF101 [17]

Jelikož se jedná o dvoupásmový pasivně dělený systém (vstupní signál se dělí až po zesílení), je další velmi důležitou součástí této soustavy také výhybka, která umožňuje frekvenční přechod mezi 2 použitými reproduktory. Její schéma je uvedeno v předchozí kapitole zabývající se dělicími kmitočty (Obr. 3.5).



Obr. 4.6: Schéma výhybky měřené reproduktorové soustavy [17]

Měřená reproduktorová soustava byla umístěna v geometrickém středu polobezodrazové místnosti, jak vyžaduje státní norma. [15] Vzdálenost od odrazivé roviny jsme zvolili 1,5 m, jak ukazuje schematický obrázek (Obr. 5.8).

Všechny technické specifikace výše uvedených měřicích přístrojů byly získány převážně z katalogových listů výrobců (Příloha A, Příloha B) a záznamů měření technické podpory distributora Prodance [17]

4.1.5 Měřicí karta

Pro měření a vývoj aplikace v prostředí LabVIEW bylo kvůli své kompatibilitě se softwarem výhodné použít měřicí moduly firmy National Instruments. Konkrétně se jednalo o univerzální modulové šasi cDAQ-9174, dále pak o sběrný AD převodník: modul NI-9234, a nakonec o analogový výstupní modul NI-9263. Oba moduly taktéž umožňují automatické načtení parametrů díky technologii TEDS.



Obr. 4.7: Měřicí aparatura pro LabVIEW - NI cDAQ-9174; modul NI-9234; modul NI-9263 [18]

Technické specifikace použitých měřicích modulů jsou převzaty z katalogových produktových listů [18] a jsou shrnuty v níže uvedených tabulkách. (Tabulka 5, Tabulka 6)

Analogové vstupy	4
Vzorkovací rozlišení	24 bitů
Typ vstupního signálu	napětí
Dynamický rozsah	102 dB
Operační teploty	-40 °C do 70 °C

Tabulka 5: Technické parametry NI-9234 [18]

Analogové výstupy	4
Vzorkovací rozlišení	16 bitů
Typ výstupního signálu	napětí
Rozsah výst. napětí	±10 V
Operační teploty	-40 °C do 70 °C

Tabulka 6: Technické parametry NI-9263 [18]

4.1.6 Polobezodrazová místnost

Velmi důležitou roli při provedeném měření sehrálo pochopitelně také prostředí, do kterého byl samotný měřicí řetězec zasazen. Vzhledem k dostupným možnostem byla k měření použita polobezodrazová místnost, která je součástí výzkumné experimentální hlukové laboratoře Vysoké školy báňské - Technické univerzity Ostrava. Tato certifikovaná měřicí polobezodrazová umožňuje provádět normalizovaná měření na objektech nepřesahujících rozměry uvedené níže v tabulce (Tabulka 7).

Základním prvkem této místnosti jsou klíny z absorpčního materiálu, které jsou následně opatřeny pruživým potahem, stabilizujícím jejich tvar a zabraňujícím vypadávání minerálních vláken. Tvar a rozměry těchto klínů byly vypočítány stavební

firmou na základě požadovaného rozměru komory a určují frekvenční charakteristiku místnosti. Polobezodrazová místnost byla zkonstruována na základě požadavků řady norem ČSN EN ISO 3745.

Rozměry místnosti [šířka; délka; výška]	9,5 m; 8,5 m; 2,6 m
Max rozměry měřených objektů [šířka; délka; výška]	1,1 m; 1,1 m; 1,1 m
Frekvenční útlum	od 100 Hz
Absorpční materiál	porézní materiál z minerálních vláken

Tabulka 7: Parametry polobezodrazové místnosti VŠB-TUO

Pro správné určení přenosových charakteristik je zapotřebí znát vlastnosti daného akustického prostředí, ve kterém chceme tyto funkce měřit, jak již bylo zmíněno dříve v kapitole 3.1.1. Pro tyto účely slouží významná akustická veličina doba dozvuku, což je nejpoužívanější parametr při zjišťování průběhu dozívání zvuku v určitém akustickém prostoru. Dobou dozvuku je pak nazývána doba, za kterou se sníží hladina akustického tlaku o 60 dB, což představuje pokles 10^6 krát vůči své původní hodnotě. [6]



Obr. 4.8: Fotografie z provedeného měření v polobezodrazové místnosti VŠB-TUO

Doba dozvuku je jednotná pro celý objem místnosti (v případě ideálně difúzního akustického pole) a závisí na absorpčních vlastnostech materiálů v ní použitých.[2] Měření této veličiny nespadá do obsahu této práce, avšak nesmíme opomenout její význam při následném měření frekvenčních charakteristik. Více o tomto problému v kapitole 5.3.1, kde je popsán vliv odraženého signálu na konečné výsledky.

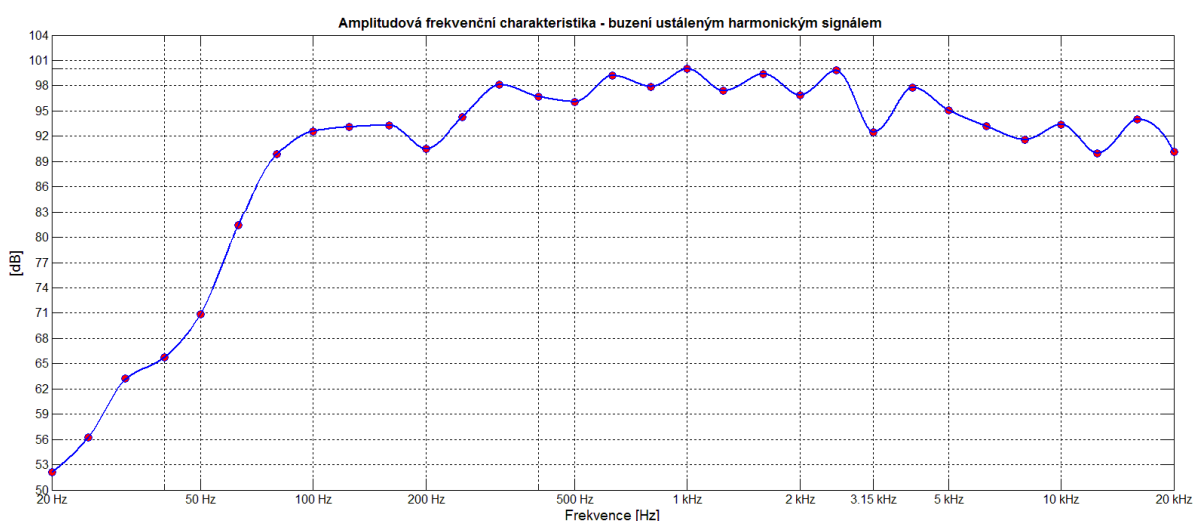
5 Metody pro měření FRF a amplitudové frekvenční charakteristiky

5.1 Buzení ustáleným harmonickým signálem (čistými tóny)

První metodu, kterou jsme využili pro získání amplitudové frekvenční charakteristiky měřené reproduktorové soustavy, byla metoda buzení ustáleným harmonickým signálem neboli čistými tóny.

Tento nejjednodušší postup je implementován i v profesionálním softwarovém balíku PULSE, pocházejícím z dílny dánské firmy Brüel & Kjær. Konkrétně se jedná o modul "Loudspeaker Test", který vzestupně generuje čisté tóny korespondující středním frekvencím třetinooktavových pásem, přičemž jsou data z měřicího mikrofónu v reálném čase analyzována a následně graficky vyznačena. Tato metoda pracuje s diskrétními kmitočty, které v následných krocích pokrývají celý frekvenční rozsah, v němž má být amplitudová frekvenční charakteristika vyhodnocena. [19]

Jednoduchost a přímočarost této metody je však draze vykoupena její časovou náročností a ekonomickou neefektivností, jelikož je zapotřebí měřit přes celý rozsah frekvenční oblasti a většinou je také podmínkou vlastnit příslušné softwarové moduly. Díky skutečnosti, že měření bylo vyhodnoceno pouze ve třiceti frekvencích třetinooktavového spektra a výsledná křivka amplitudové frekvenční charakteristiky musela být interpolována, lze její níže uvedený průběh (Obr. 5.1) považovat spíše za orientační.



Obr. 5.1: Průběh amplitudové frekvenční charakteristiky - buzení čistými tóny

Název metody	Buzení ustáleným harmonickým signálem
Frekvenční rozsah měření	20 Hz - 20 kHz
Doba měření	180 s
Počet bodů frekv. charakteristiky	30
Měřicí vzdálenost (mikrofon-repro)	1 m
Teplota a relativní vlhkost vzduchu	20 °C; 48%

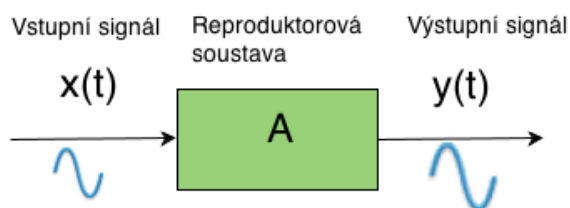
Tabulka 5: Základní parametry měření při buzení čistými tóny

Matematický zápis:

$$x(t) = \sin(\omega_0 \cdot t) \quad (5.1)$$

$$y(t) = A \cdot \sin(\omega_0 \cdot t + \varphi) \quad (5.2)$$

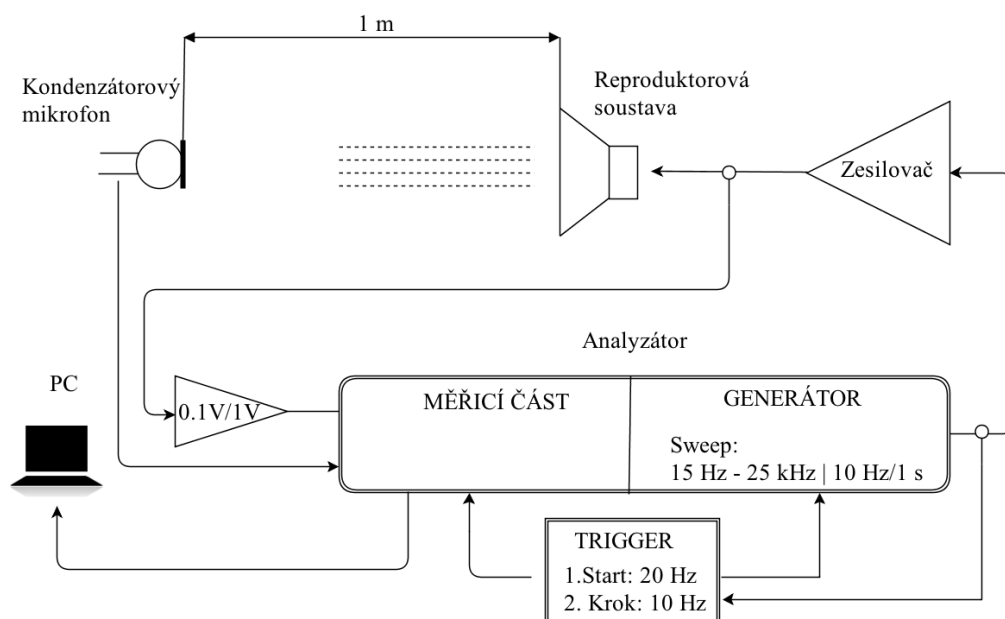
Buzení harmonickým vstupním signálem $x(t)$ vyvolá odezvu reproduktorové soustavy, kterou je výstupní signál $y(t)$ charakterizovaný stejným kmitočtem.[20] Výstupní harmonický signál však může mít rozdílnou amplitudu a rovněž může být vůči vstupnímu signálu fázově posunut.



Obr. 5.2: Schéma metody doplňující matematický zápis

5.2 Buzení spojitě rostoucím kmitočtem (SWEEP)

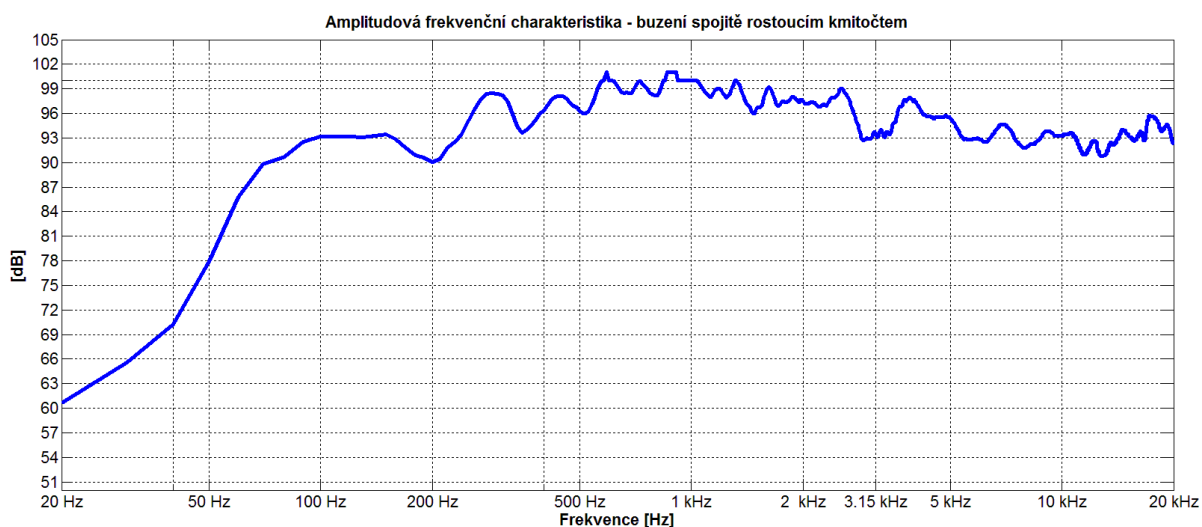
Druhou metodou použitou při zjišťování amplitudové frekvenční charakteristiky bylo zvoleno buzení pomocí generovaného, spojitě rostoucího kmitočtu (angl. sweep). Princip této metody je velmi podobný předchozímu s tím rozdílem, že je zde využito spojitěho navyšování budicí frekvence, kterou opět snímá měřicí mikrofon, a předem nastavená spoušť (angl. trigger) v analyzátoru diskretizuje tento signál na zvolené úseky, které analyzátor společně se softwarem následně vyhodnotí. Schéma této metody je znázorněno na následujícím obrázku (Obr. 5.3).



Obr. 5.3: Schéma měření amplitudové frekvenční charakteristiky při buzení sweepem

Součástí použitého analyzátoru je rovněž signálový generátor, který generoval spojitě rostoucí signál v daném rozmezí od 15 Hz-25 kHz vždy s lineárním přírůstkem 10 Hz za 1 s. Spoušť, jež je také součástí analyzátoru řídila, snímání vzorků z mikrofónu, přičemž začátek snímání byl nastaven na 20 Hz s krokem 10 Hz. Odečet vzorků skončil při frekvenci 20 kHz, díky čemuž jsme získali 2 000 vzorků.

Tato metoda se výše zvoleným postupem stává o mnoho rychlejší než metoda buzení čistými tóny. Navíc lze s její pomocí při větším vzorkování dostat velký počet uzlů, z nichž jsme schopni vykreslit již detailnější amplitudovou charakteristiku, která je prezentována na následujícím obrázku. (Obr. 5.3)



Obr. 5.4: Průběh amplitudové frekvenční charakteristiky - buzení spojitě rostoucím kmitočtem

Název metody	Buzení spojitě rostoucím kmitočtem
Frekvenční rozsah měření	20 Hz - 20 kHz
Doba měření	22 s
Počet bodů frekv. charakteristiky	2 000
Měřicí vzdálenost	1 m
Teplota a relativní vlhkost vzduchu	20 °C; 45%

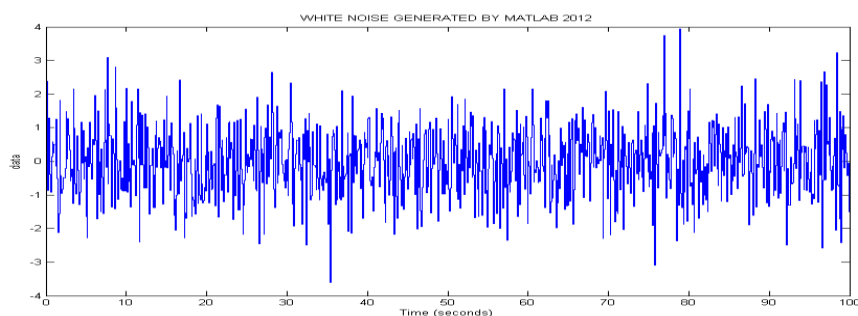
Tabulka 9: Základní parametry měření při buzení spojitě rostoucím kmitočtem

5.3 Metoda hodnocení pomocí náhodného hluku

Frekvenční přenosovou funkci (FRF) lineárního dynamického systému lze podle [21] měřit také porovnáním amplitudy a fáze harmonického signálu na vstupu a výstupu měřené soustavy. V našem případě to byl vstupní napěťový signál $X(k)$ měřený na zesilovači a signál výstupní $Y(k)$, hladina akustického tlaku, měřený mikrofonom. Lineárním dynamickým systémem pro nás byla měřená reproduktorová soustava, jejíž linearita zaručuje neměnnost jednotlivých frekvenčních složek při jejím průchodu.

Parametry reproduktorů jsou často měřeny harmonickým signálem sinusového průběhu. Reproduktořové soustavy jsou však určeny primárně k reprodukci signálu hudebního, který je složen z různých typů signálů (základních tónů, harmonických tónů, šumů a ruchů). Reproduktoř měřený pouze harmonickým signálem tak může vykazovat odlišnost chování při skutečné reprodukci, pokud nedisponuje plnou kontrolou nad hmotou membrány a jejím správným pohybem.[22] Postup z předchozích dvou metod, při kterém se jako vstupní signál volí signál harmonický, je navíc poměrně zdoluhavý kvůli postupnému měnění vstupních frekvencí.

Byla zvolena výhodnější metoda, při které na vstup přivedeme testovací signál obsahující všechny frekvenční složky z frekvenčního rozsahu, pro který FRF zjišťujeme. Konkrétně byl tímto testovacím signálem použit bílý šum, který spadá mezi signály širokofrekvenční a vykazuje neměnnost amplitudy svých složek s tolerancí 3 dB.

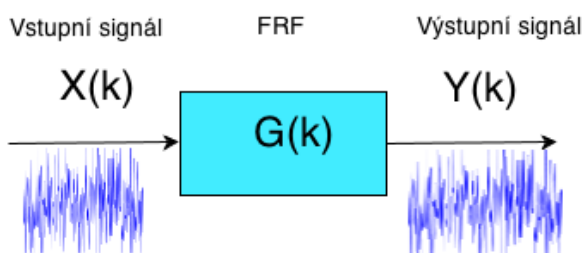


Obr. 5.5: Signál bílého šumu vygenerovaný pomocí programu MATLAB

Bílý šum (angl. white noise) lze charakterizovat jako náhodný signál se stálou výkonovou spektrální hustotou pro všechny frekvence (5.3). Jedná se o časově ustálený signál, obsahující harmonické frekvence v celé oblasti slyšitelného spektra, přičemž má shodný výkon ve všech pásmech konstantní šířky (CPB). Jeho název pramení z analogie s bílým světlem, které rovněž obsahuje všechny světelné frekvenční složky. Je zřejmé, že pokud by měl šum na všech frekvencích nenulový výkon, jeho celkový výkon by musel být nekonečný.[21] Ve skutečnosti jej označujeme jako bílý, pokud na definovaném frekvenčním rozsahu, povětšinou v rozmezí slyšitelného pásma, je jeho spektrum ploché.

$$S_{xx}(\omega) = \int_0^{\infty} \sigma^2 \cdot \delta(\tau) e^{-j\omega\tau} d\tau = \omega^2 \quad (5.3)$$

Signál bílého šumu se při matematickém modelování vytváří pomocí generátoru náhodných čísel. V analogových přístrojích se pro jeho generaci využívá zesílení šumových napětí elektronických prvků, jež v nich vznikají díky tepelnému namáhání.[6]



Obr. 5.6: Schéma výpočtu FRF pomocí náhodného hluku

Praktický výpočet FRF touto metodou lze podle [21] rozdělit do následujících kroků:

- vyhodnocení DFT z časového záznamu délky N vstupního $X(k)$ a výstupního $Y(k)$ signálu testované reproduktorové soustavy
- podíl dvou komplexních čísel $Y(k) = |Y(k)| \cdot \exp(j\beta)$ a $X(k) = |X(k)| \cdot \exp(j\alpha)$ podle rovnice (5.4)
- Frekvenční přenosovou funkci získám opakováním výpočtu podílu (5.4) v rozsahu indexu k podle (5.5)

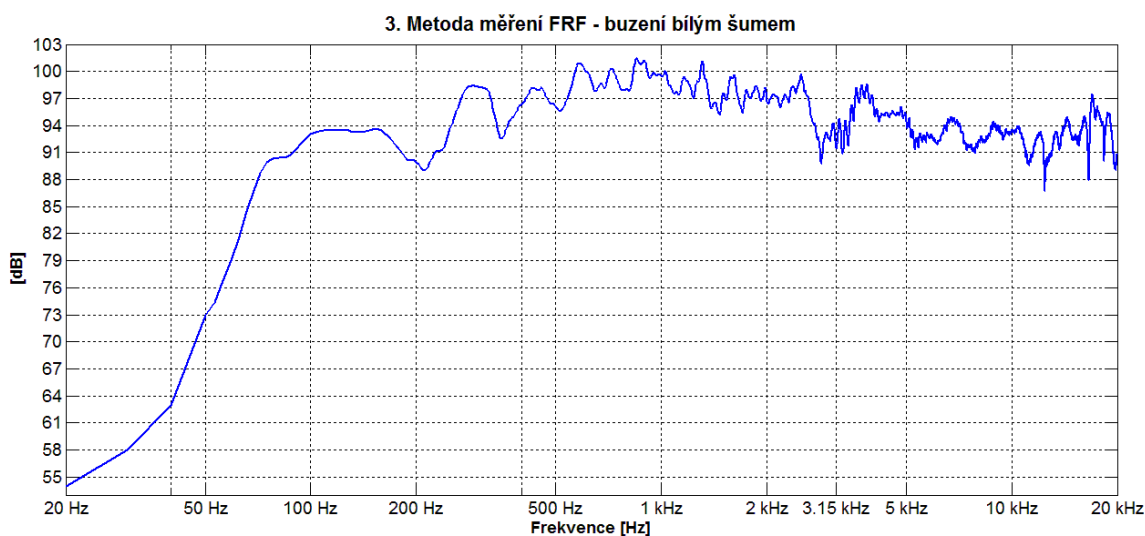
$$G(k) = \frac{Y(k)}{X(k)} = \frac{|Y(k)|}{|X(k)|} \cdot \exp(j(\beta - \alpha)) = A(k) \cdot \exp(j\varphi(k)) \quad (5.4)$$

$$k = 0, 1, 2, \dots, N/2 \quad (5.5)$$

kde $A(k)$ je amplituda frekvenčního přenosu a $\varphi(k)$ jeho fázový posun.

Při hodnocení metodou náhodného hluku bylo rovněž využito rozsáhlé funkcionality analyzátoru PULSE firmy Brüel & Kjær a softwaru B&K Pulse - Labshop, kdy tato sestava sloužila opět jako generátor i analyzátor. V analyzátoru poté docházelo k numerickému porovnávání amplitud vstupního a výstupního signálu. Vyhodnocování tohoto záznamu bylo provedeno opakovaně z důvodu požadavku na eliminaci náhodného šumu, čehož bylo dosaženo průměrováním získaného průběhu.

Výsledkem poté byl již detailní průběh FRF (6 400 uzlů), který lze na základě zvolené metody považovat za přesný popis měřeného dynamického systému (Obr. 5.7).



Obr. 5.7: Průběh FRF získaný pomocí náhodného hluku (bílého šumu)

Nevýhoda této metody však spočívá v délce měření způsobené požadavkem na průměrování, což může vést k zahrnutí chyby pramenící z odrazu zvukových vln od podlahy polobezodrazové místnosti. Tato chyba může výsledný průběh FRF částečně ovlivnit, jak je dále popsáno v kapitole 5.3.1.

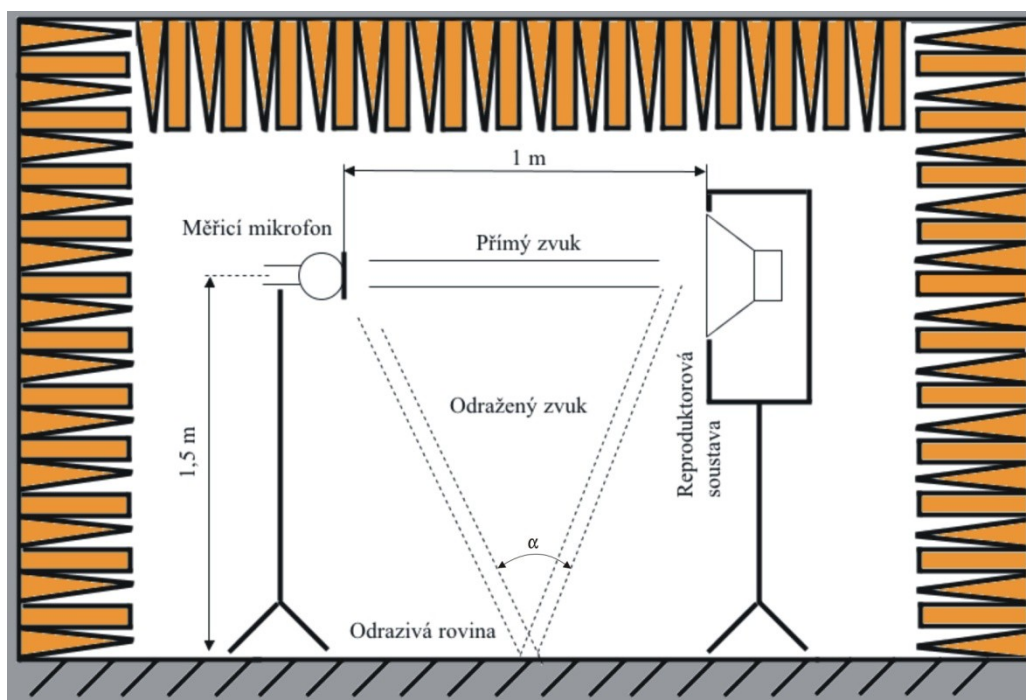
Název metody	Hodnocení pomocí náhodného hluku
Frekvenční rozsah měření	20 Hz - 20 kHz
Doba měření	10 s
Počet bodů frekv. charakteristiky	6 400
Měřicí vzdálenost	1 m
Teplota a relativní vlhkost vzduchu	20 °C; 45%

Tabulka 9: Základní parametry měření při hodnocení náhodným hlukem

5.3.1 Dopravní zpoždění

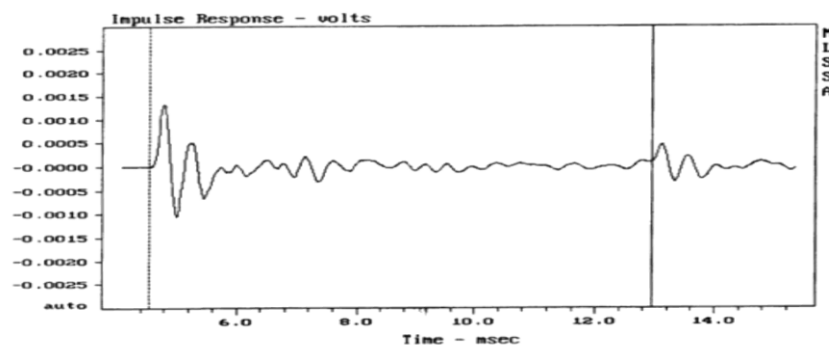
Jelikož k samotnému měření nebyla k dispozici místnost bezodrazová, nýbrž polobezodrazová, je nutno správně interpretovat signál získaný měřicím mikrofonom. V místnosti bezodrazové jsou všechny stěny opatřeny absorpčními klíny, a tudíž by zde v ideálním případě nemělo docházet k žádným odrazům. V našem případě je jedna stěna místnosti - podlaha - sestavena z několika vrstev pevného materiálu, který téměř vůbec dopadající zvuk neabsorbuje. Z podstaty zvuku vyplývá, že se bude chovat analogicky k ostatním typům vlnění a to tak, že dojde k jeho odrazu od svrchní odrazivé plochy podlahy.

Z výše uvedeného je patrné, že výsledný zvukový signál, jenž k mikrofону akustickým prostředím dorazí, bude superponován z části přímé a odražené zvukové vlny, jak popisuje následující obrázek (Obr. 5.8).



Obr. 5.8: Schéma odrazu signálu od odrazivé roviny v polobezodrazové místnosti

Tento nežádoucí jev se při vyhodnocování měření promítne jednak do průběhu impulzní odezvy a následně také do frekvenční přenosové funkce.[23] U impulzní odezvy dojde k jejímu zvlnění přesně v čase, kdy odražená vlna začne u snímače interferovat s vlnou přímou. Toto místo je znázorněno druhou svislou čarou v následujícím obrázku. (Obr. 5.9).

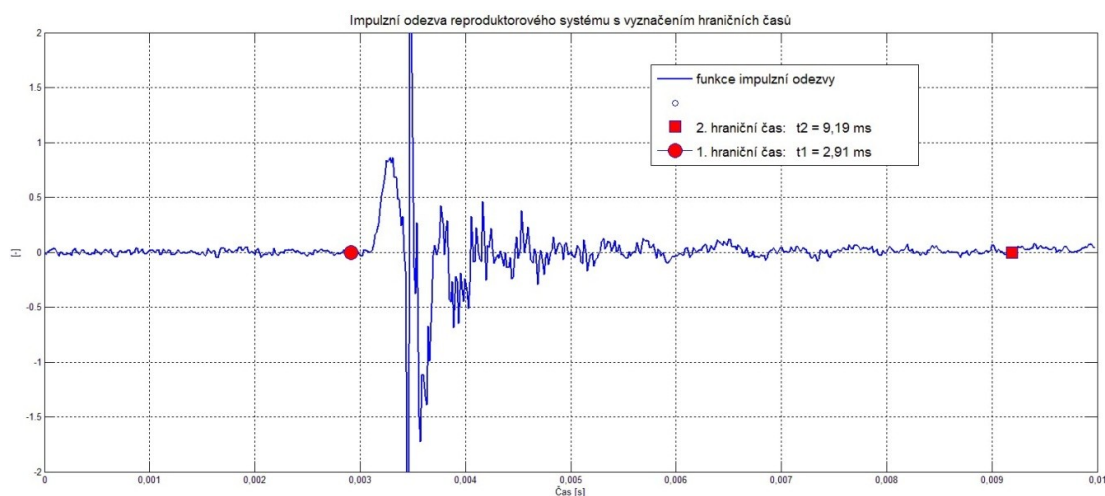


Obr. 5.9: Impulzní odezva středotónového reproduktoru B&C speakers [17]

Kritický čas, za který dojde ke zkreslení signálu, lze vypočítat ze základních poznatků o zvukovém vlnění, kdy můžeme opět využít analogie s jinými vlněními, tedy i platnost Snellova zákona o rovnosti odrazových a dopadových úhlů. Rychlost zvuku v suchém vzduchu o teplotě 20 °C je podle [1] udána $c = 344$ m/s. Dráha přímé zvukové vlny od reproduktoru k mikrofonu má délku $s_1 = 1$ m, což je dané stanovenou geometrií úlohy. Dráha vlny odražené je, s využitím (5.6) a Snellova zákona, délky $s_2 = 3,16$ m

$$s_2 = \sqrt{1,5^2 + 0,5^2} \cdot 2 = 3,16 \text{ m} \quad (5.6)$$

Dopravní zpoždění zvukové vlny přímo dopadající na mikrofon je poté charakterizováno časem $t_1 = 2,91$ ms (5.2), jenž je potřebný k získání prvního vzorku signálu měřicím mikrofonem od vyslání první zvukové vlny elektroakustickým měničem. Tento čas tak přímo udává dopravní zpoždění měřené úlohy, čehož využijeme pro stanovení prvního vzorku impulzní odezvy (Obr. 5.10 - 1. hraniční čas), který je důležitý pro určení přesného začátku jejího průběhu, čehož využijeme u dalších výpočtů.



Obr. 5.10: Impulzní odezva měřeného reproduktorového systému s vyznačením hraničních časů

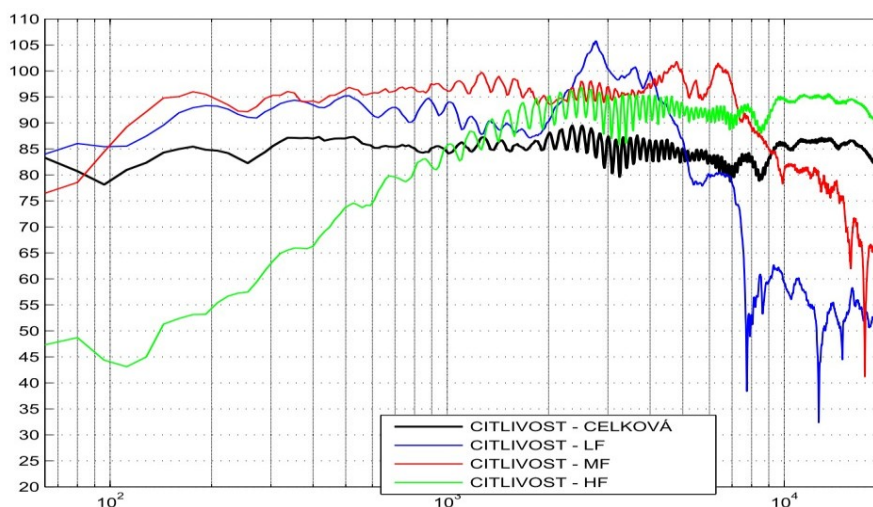
Pozn.: Do času t_1 není zahrnuto dopravní kabelové zpoždění signálu na cestě z analyzátoru, zesilovače do reproduktoru, jelikož zde dochází k signálovému přenosu rychlostí světla, která je přibližně milionkrát větší než rychlost zvuku.

$$t_1 = \frac{s_1}{c} = \frac{1}{344} = 2,91 \text{ ms} \quad (5.7)$$

Čas t_2 (5.8) dále udává dobu, za kterou dorazí k měřicímu mikrofonu vlna odražená od podlahy. V tomto čase (Obr. 5.10 - 2. hraniční čas) dochází k interferenci vlny přímé s vlnou odraženou, a tak je nutné všechny následující vzorky z impulzní odezvy rovněž odebrat.

$$t_2 = \frac{s_2}{c} = \frac{3,16}{344} = 9,19 \text{ ms} \quad (5.8)$$

Pokud bychom tento důležitý fakt interference vln opomenuli a z impulzní odezvy takto zkreslené vzorky neodstranili, dostali bychom frekvenční přenosovou funkci, která výrazně osciluje kolem svého skutečného průběhu. Příkladem takto nesprávně prezentované frekvenční charakteristiky je následující obrázek (Obr. 5.11)



Obr. 5.11: Frekvenční charakteristika vypočítaná z nesprávně oříznuté impulzní odezvy

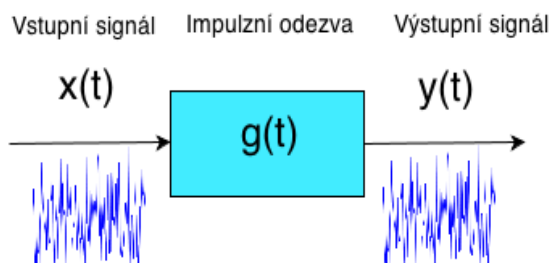
Z porovnání impulzní odezvy středotónového reproduktoru získané od výrobce (Obr. 5.9) a námi naměřené impulzní odezvy reproduktorového systému (Obr. 5.13) je patrný rozdíl právě v čase zvlnění a velikosti jejího zvlnění. Z grafu impulzní charakteristiky výrobce je patrná geometrie jejich měření, kdy podle 2. hraničního času $t'_2 = 13 \text{ ms}$ (označen svislou úsečkou) můžeme odhadnout, že měřicí mikrofon byl umístěn ve vzdálenosti 2 m od reproduktoru, přičemž vertikální vzdálenost od podlahy byla rovněž 2 m.

V našem případě (Obr. 5.13) nebylo zvlnění impulzní odezvy v místě 2. hraničního času znatelné, což bylo zapříčiněno zvolením lepší geometrie měření (Obr. 5.8). Při měření byl mikrofon ve vzdálenosti 1 m od reproduktoru, čímž se úhel mezi původní a odraženou vlnou α zmenšil na velikost $\alpha = 36,87^\circ$, což znamená, že při dopadu na odrazivou rovinu dojde k většímu rozptylu akustické energie.

V kapitole 3.2 o směrovém vyzařování reproduktorů již bylo zmíněno, že velikost akustické intenzity a hustoty akustické energie klesá v závislosti na úhlu od referenční osy reproduktoru. Tento fakt spolu s disperzí akustické energie při odrazu pod ostrým úhlem α je příčinou toho, že při námi získané impulzní odezvě systému není patrné její výraznější zvlnění v čase t_2 při interferenci obou vln.

5.4 Metoda vyhodnocení FRF z impulzní odezvy

Tato metoda pro vyhodnocení frekvenční přenosové funkce reproduktorového systému je ve své podstatě založena rovněž na matematických úpravách vstupního a výstupního signálu, ze kterých lze získat impulzní odezvu systému a následně pak frekvenční přenosovou funkci.

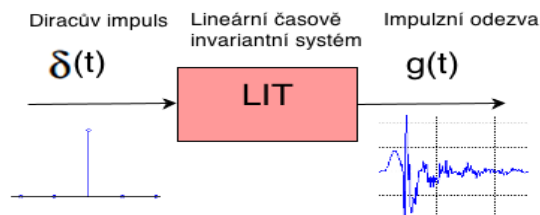


Obr. 5.12: Průchod náhodného signálu lineárním dynamickým systémem

V akustice se impulzní odezva používá zejména pro stanovení vlastností akustického prostoru, např. doby dozvuku (více kapitola 4.1.5). U prvků elektroakustických lze s její pomocí charakterizovat základní parametry reproduktorových systémů. Aby mohl být dále popsán výpočetní průběh metody, je zapotřebí nejdříve přiblížit matematické pozadí a podstatu impulzní charakteristiky, čímž se zabývá následující kapitola 5.4.1.

5.4.1 Impulzní charakteristika

Impulzní charakteristika (IR) představuje odezvu systému na Diracův jednotkový impuls a bude dále značena $g(t)$. Aby toto tvrzení platilo, daný systém musí být lineární a časově invariantní (LTI). Lineární systém je takový, který mění pouze amplitudu a fázi procházejícího signálu, přičemž frekvence zůstává stejná. Časová invariantnost značí neměnnost systému v čase, kdy při buzení signálem posunutým v čase $x(t - t_0)$ bude i výstupní signál rovněž posunutý $y(t - t_0)$. [20] Stanovením průběhu impulzní funkce dostaneme užitečný nástroj, který lze využít k teoretické analýze různých LTI systémů.



Obr. 5.13: Schéma získání impulzní odezvy LIT

Za předpokladu, že lineární dynamický systém budíme jedním vstupním signálem $x(t)$ a známe jeho impulzní charakteristiku $g(t)$, jsme schopni podle [21] pomocí konvoluce těchto dvou funkcí (5.10) zjistit výstupní signál daného systému $y(t)$.

$$y(t) = x(t) * g(t) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t - \tau) \cdot g(\tau) d\tau = \int_{-\infty}^{\infty} x(\tau) \cdot g(t - \tau) d\tau \quad (5.10)$$

Obraz výstupního signálu $Y(\omega)$ získáme Fourierovou transformací konvoluce, jež odpovídá součinu obrazů impulzní charakteristiky $G(j\omega)$ a vstupního signálu $X(\omega)$.

$$Y(\omega) = G(j\omega) \cdot X(\omega) \quad (5.11)$$

Fourierovou transformací obrazu impulzní charakteristiky (5.12) pak snadno získáme hledanou impulzní odezvu $g(t)$.

$$FT\{g(t)\} = G(j\omega) \quad (5.12)$$

$$g(t) = FT^{-1}\{G(j\omega)\} \quad (5.13)$$

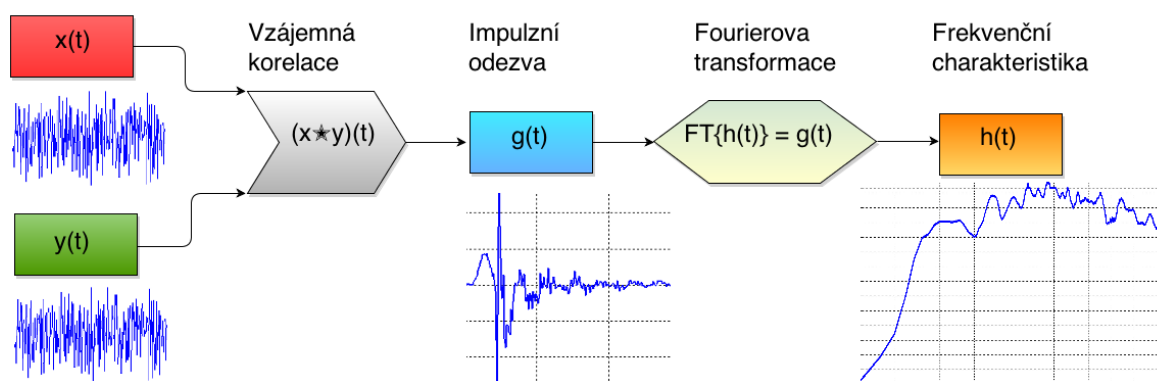
Impulzní odezva je kmitavý přechodový děj, jejíž typický průběh je znázorněn na obrázku (Obr. 5.10). Posunutí impulzní funkce od počátku v kladném směru časové osy je dáno dopravním zpožděním systému, jak již bylo vysvětleno v kapitole 5.3.1.

Měřicím signálem byl opět zvolen bílý šum, jenž svými vlastnosti splňuje kritéria budícího signálu této metody, kterými jsou:

- budící signál musí být energeticky bohatý natolik, aby testovanou reproduktorovou soustavu dostatečně vybudil s přijatelným odstupem signálu k šumu [20]
- budící signál musí mít stejnou spektrální hustotu pro všechny frekvence
- autokorelační funkce budícího signálu je rovna Diracovu impulzu (5.14)

$$R_{xx}(\tau) = \sigma^2 \cdot \delta(\tau) \quad (5.14)$$

Praktický výpočet FRF touto metodou lze rozdělit do následujících fází: (Obr. 5.14)

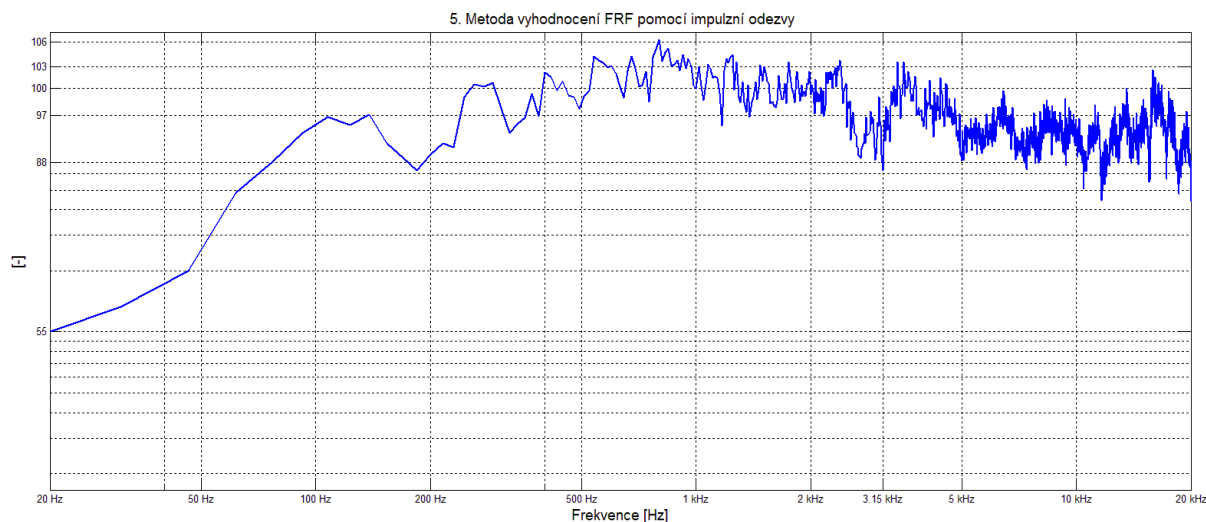


Obr. 5.14 Výpočtové schéma metody získání FRF z impulzní odezvy

- v první fázi vstupuje do výpočtového řetězce budící signál $x(t)$, který je reprezentován napětím měřeným na svorkách zesilovače, společně se signálem výstupním $y(t)$, kterým je průběh napětí získaného přeměnou akustického tlaku v měřicím mikrofону
- dále pak vzájemnou korelaci těchto dvou signálů získám průběh impulzní odezvy $g(t)$ měřeného reproduktorového systému (5.16), (5.17)
- následuje převedení průběhu impulzní odezvy z časové oblasti do oblasti frekvenční, čehož je uskutečněno za pomoci Fourierovy transformace (5.15), která byla provedena pomocí skriptu napsaného v softwaru MATLAB (Příloha D)

$$h(t) = FT^{-1}\{g(t)\} \quad (5.15)$$

- výsledný průběh po aplikaci Fourierovy transformace [24] na impulzní charakteristiku je hledaná frekvenční přenosová funkce $h(t)$ (Obr. 5.16)

Obr. 5.15: Průběh FRF $h(t)$ získaný pomocí impulzní odezvy

Název metody	Vyhodnocení FRF z impulzní odezvy
Frekvenční rozsah měření	20 Hz - 20 kHz
Doba měření	5 s
Počet bodů frekv. charakteristiky	1310
Měřicí vzdálenost	1 m
Teplota a relativní vlhkost vzduchu	20 °C; 45%

Tabulka 10: Základní parametry měření při hodnocení náhodným hlukem

V druhé fázi praktického výpočtu FRF byla použita vzájemná korelace. Samotná korelace představuje matematickou operaci, která je velmi podobná již dříve popsané konvoluci (5.10). Rozdíl těchto dvou matematických operací spočívá v časovém překlopení druhé vstupní funkce $g(t)$. Korelaci signálu $x(t)$ se signálem $g(t)$ pak rozumíme následující výraz (5.16).

$$g(t) = (x * y)(t) = x(t) * y(t) = \int_{-\infty}^{\infty} x(\tau) \cdot y(t + \tau) d\tau \quad (5.16)$$

U diskrétních signálů x_k a g_k , kdy známe množinu bodů a jejich funkčních hodnot, pak integrál uvedený v (5.16) přechází v jejich sumaci ve zvoleném rozsahu. (5.17)

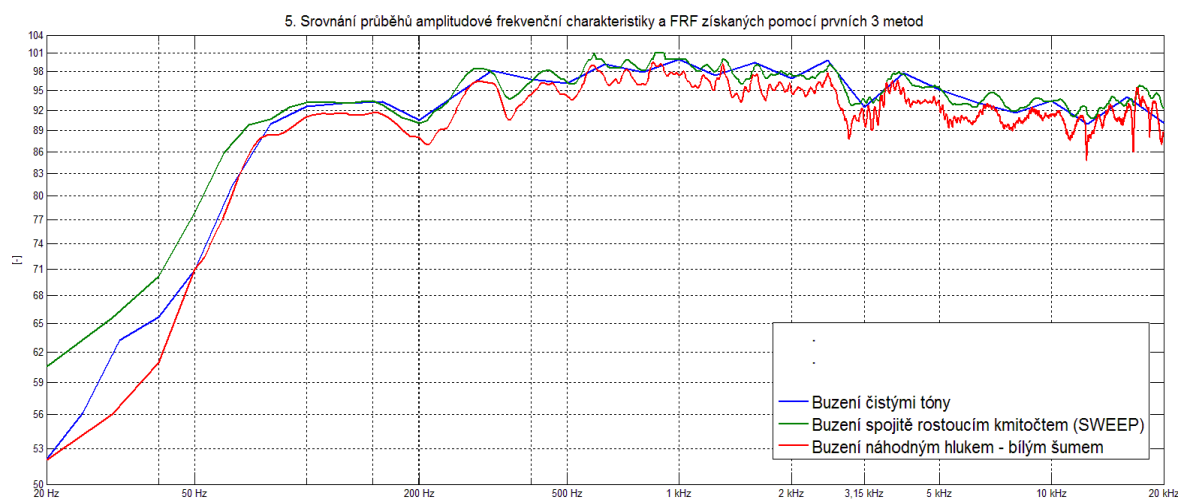
$$g(t) = (x * y)_k = \sum_{-\infty}^{\infty} x \cdot y_{k+i} \quad (5.17)$$

V teorii zpracování signálu je hojně používána rovněž vzájemná korelace dvou totožných signálů neboli autokorelace ($f * f$). Její využití spočívá v možnosti určení soběpodobnosti signálu, čímž lze odhalit např. harmonický signál v šumu.

5.5 Zhodnocení použitých metod

Všechny použité metody vykazují při správném nastavení vstupních parametrů srovnatelné výsledky. To znamená, že grafická zobrazení amplitudových frekvenčních charakteristik a frekvenčních přenosových funkcí vykreslených pomocí jednotlivých metod mají téměř shodný průběh přes celou šířku slyšitelného pásma.

Rozdíly použitých metod jsou patrné hlavně v počtu získaných uzlů pro vykreslení potřebného průběhu frekvenční charakteristiky. Počet uzlů se pohybuje v rozmezí od 30 do 6400. Z rozlišení frekvenční charakteristiky tak pochopitelně odvisí i přesnost vykresleného průběhu mezi jednotlivými uzly, který musí být interpolován. Dalším podstatným rozdílem byla také doba potřebná k naměření a vyhodnocení potřebných dat, přičemž se tento čas pohyboval v rozmezí od 180 s po pouhých 5 s, což může být například u sériového měření reproduktorových soustav podstatným aspektem.



Obr. 5.16: Srovnání frekvenční amplitudové charakteristiky a FRF získaných pomocí tří metod

Pro normalizaci úrovně amplitudové frekvenční charakteristiky a FRF všech měřicích metod byla zvolena referenční frekvence 1 kHz, pro kterou při měření referenční reproduktorové soustavy odpovídá hodnota 100 dB na amplitudové ose. Pro kontrolu frekvenčních hodnot přepočítaných z časové oblasti po aplikaci Fourierovy transformace byla zvolena frekvence 3,15 kHz, kde u referenční reproduktorové reprosoustavy docházelo k citlivostnímu propadu na ≈ 92 dB, což mohlo být způsobeno horším nakonfigurováním použité výhybky.

Je také potřeba zmínit se o frekvenční oblasti od 20 Hz-100 Hz, ve které dochází u všech výše uvedených metod ke zhoršení spolehlivosti výsledků, a tedy i k částečnému

zkreslení frekvenční charakteristiky. Tento fakt je dán především akustickými vlastnostmi polobezodrazové místnosti, jejíž absorpční klíny jsou navrženy pro tlumení až od frekvence 100 Hz. Dále k tomuto zkreslení průběhu FRF přispívá i skutečnost, že zvuková vlna o frekvenci 20 Hz má (při rychlosti zvuku $c = 344$ m/s) délku $\lambda = 16,7$ m (5.18).

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{344}{20} = 16,7 \text{ m} \quad (5.18)$$

Při zvolené měřicí vzdálenosti 1 m a velmi krátké měřicí době tak může nastat situace, při které mikrofon nezaznamená ani jednu celou periodu 20 Hz vlny, na což potřebuje alespoň dobu $t_{20} = 53$ ms.

Pozn.: Pro spolehlivé výsledky v takto nízkých frekvenčních oblastech se někdy používají metody měření v úplném volném poli, kdy se například na letišti nebo rozlehlém poli zavěsí reproduktorové soustavy a mikrofon do určité výšky na jeřábové systémy.[19]

5.6 Výběr optimální metody měření

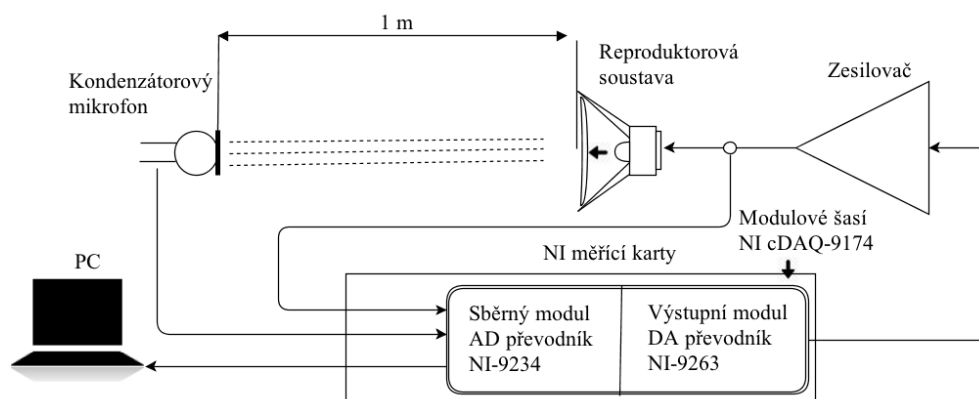
Jako nejlepší se pro naše účely jeví metoda vyhodnocení FRF z impulzní odezvy, jejíž předností je nejkratší čas měření a vysoký počet uzlů frekvenční charakteristiky, jenž umožňuje vykreslit její průběh s dostatečným rozlišením. Navíc lze pomocí časového oříznutí impulzní odezvy předejít zkreslení FRF odraženými vlnami, viz kapitola 5.3.1.

6 Vývoj měřicí aplikace v prostředí LabVIEW

LabVIEW je grafické programovací a vývojové prostředí, které se používá k programování systémů pro měření a analýzu signálů nebo k řízení a vizualizaci technologických procesů. Jedná se o grafický programovací jazyk, jehož hlavním cílem je nahrazení prostorově, finančně a časově náročných technických prostředků (hardware) virtuálním řešením za pomoci programových prostředků (software). Svým grafickým a vizuálním znázorněním jednotlivých řetězců tak poskytuje uživateli názornost a lepší orientaci v algoritmu naprogramované aplikace.[25]

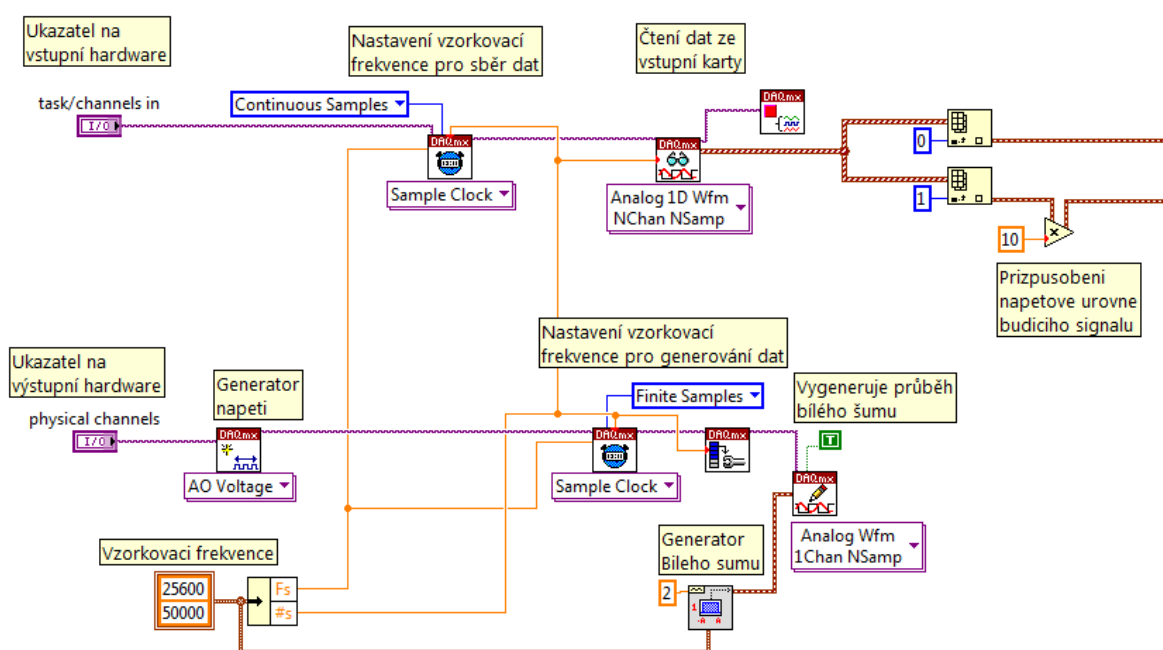
Pro vývoj měřicí aplikace v prostředí LabVIEW byla na základě výše uvedených předností zvolena metoda vyhodnocování FRF z impulzní odezvy reproduktorového systému. Dalším rozhodujícím faktorem pro výběr této metody se stala také její výpočetní

náročnost, která se dá implementací do prostředí LabVIEW pomocí dále použitých úprav a vyladění snížit.



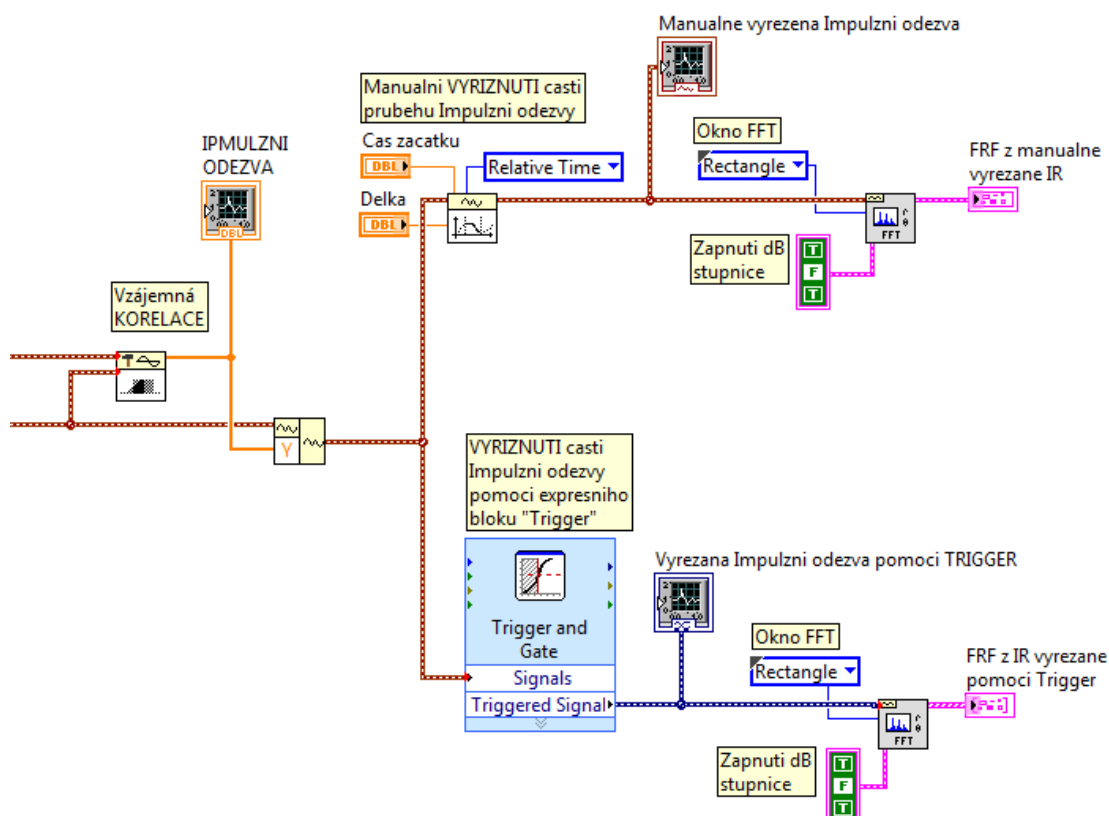
Obr. 6.1: Schéma měření s použitím měřicích modulů National Instruments

Na obrázku výše (Obr. 6.1) je znázorněno schéma měření napětových průběhů na měřicím mikrofónu a měřicím zesilovači při nahrazení analyzátoru B&K PULSE měřicími komponenty firmy National Instruments blíže popsány v kapitole 4.1.5.



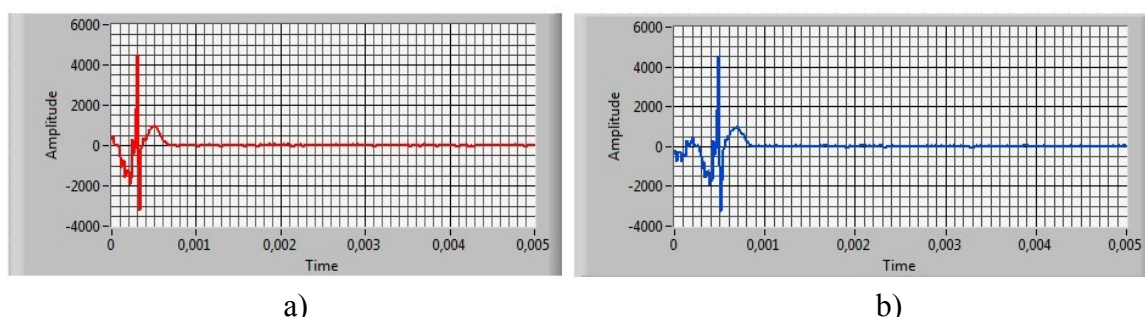
Obr. 6.2: Schéma LabVIEW 1 - Generátor bílého šumu a sběr dat pomocí modulů NI

Samotné měření probíhalo v reálném čase a bylo spouštěno a řízeno z naprogramované aplikace, která je součástí digitálních příloh této bakalářské práce (Digitální příloha A). Schéma této aplikace je uvedeno na obrázcích a v příloze: (Obr. 6.2) (Obr. 6.3) (Příloha E).



Obr. 6.3: Schéma LabVIEW 2 - Výpočet IR pomocí korelace a provedení FFT z vyříznuté IR

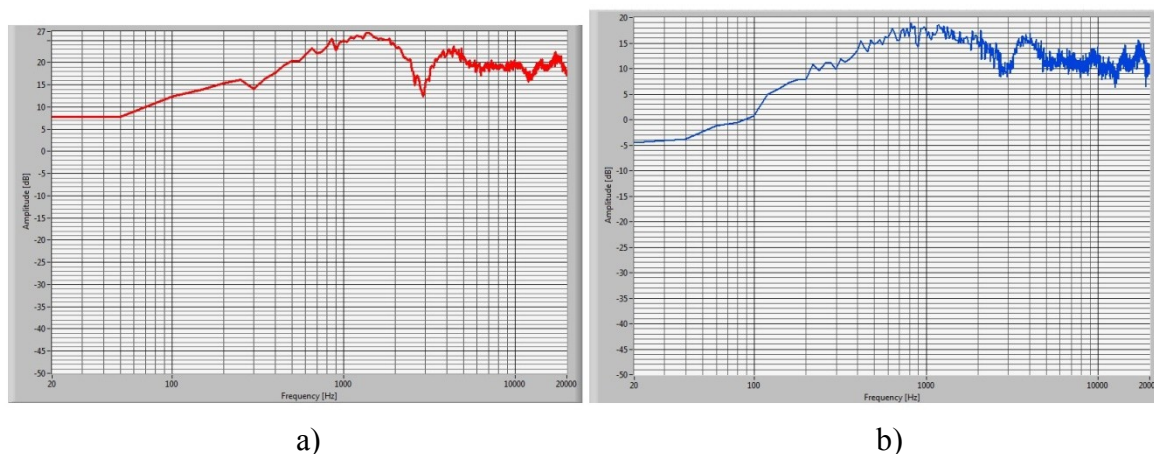
Schéma LabVIEW 1 (Obr. 6.2) názorně popisuje, jakým způsobem byl generován výstupní signál bílého šumu za pomoci výstupního modulu (DA převodníku) NI-9263. V horní části tohoto schématu je znázorněno, jak byl proveden sběr tohoto signálu z měřicího mikrofону a zesilovače. Dále byl signál rozdělen na jednotlivé průběhy, které budou dále vstupovat do výpočtu.



Obr. 6.4: Graf impulzní odezvy: a) vyříznuté manuálně, b) vyříznuté automatickou spouští (trigger)

Schéma LabVIEW 2 (Obr. 6.3) poté ilustruje provedení již dříve zmíněných matematických operací v daném pořadí. Rozdělené signály vstupují do výpočtového bloku vzájemné korelace, výsledkem čehož je impulzní odezva. (Obr. 6.4) Její průběh je poté

vhodně ořezán buď manuálně nebo za pomoci expresního bloku "Trigger and Gate2". Konečně je získaný časový výřez impulzní odezvy převeden z časové do frekvenční oblasti pomocí výpočtového bloku "FFT" (rychlé Fourierovy transformace), čímž získáme hledaný průběh frekvenční přenosové funkce. (Obr. 6.5)



Obr. 6.5: : Průběh FRF získaný: a) z impulzní odezvy manuálně vyříznuté, b) vyříznuté triggerem

7 Odladění vytvořené aplikace na měřicí kartě NI

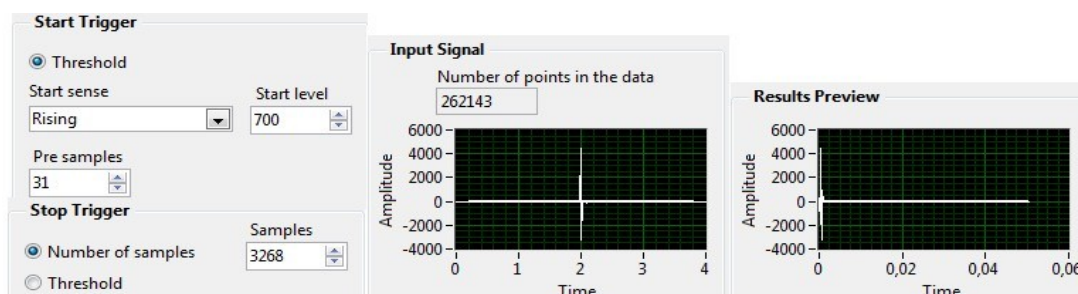
Provádění změn v konfiguraci a parametrech naprogramovaných aplikací v prostředí LabVIEW je velmi intuitivní a rychlé, což je výhoda oproti skutečným měřicím nástrojům s reálnými součástkami, kdy jsme omezeni jejich konstrukčním řešením či finanční náročností takovýchto změn.

Pro odladění byla vytvořena verze předchozí aplikace, kdy byl řetězec pro čtení dat z modulů NI nahrazen řetězcem pro načtení dvou předem zaznamenaných signálů formátu wav. Výhoda tohoto postupu spočívá především v neměnnosti zaznamenaných signálů a také v menší časové náročnosti plynoucí z vynechání algoritmu pro generování bílého šumu. Tato vytvořená aplikace je rovněž součástí digitálních příloh (Digitální příloha B) bakalářské práce a její schéma pro načítání datových souborů je znázorněno na (Obr. 7.2).

Samotné odladování vytvořené měřicí aplikace (Digitální příloha A) bylo nutné hlavně kvůli vysoké citlivosti výpočetního algoritmu na zadané parametry, především pro určení správného výřezu průběhu impulzní odezvy.

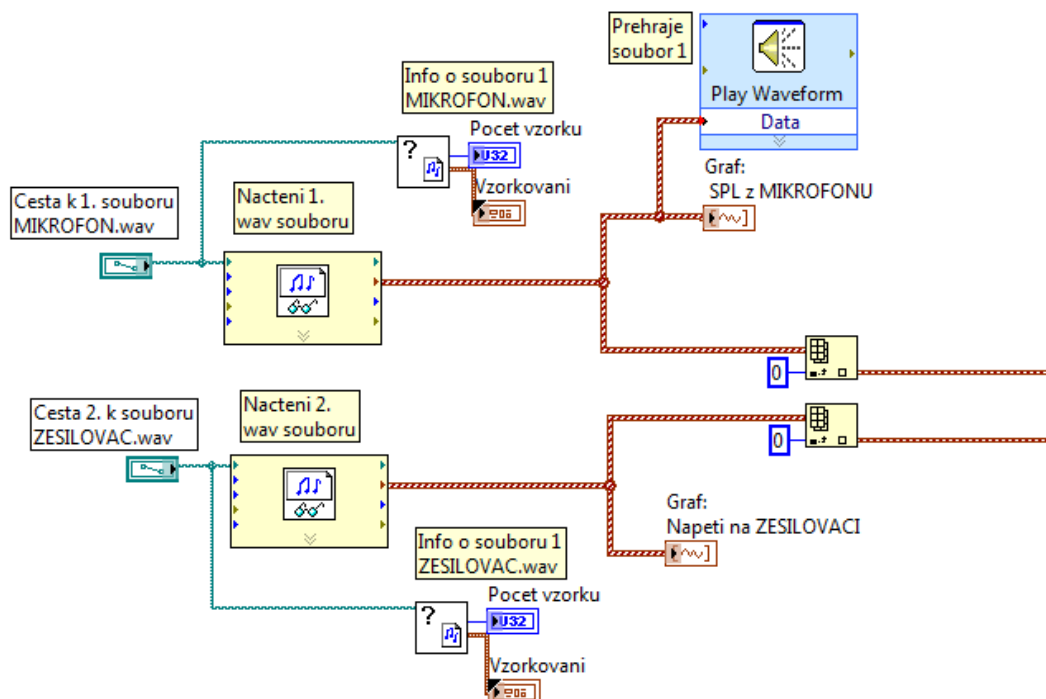
Vyřezání části impulzní odezvy bylo v aplikacích realizováno dvěma způsoby. Prvním způsobem bylo manuální zadání času začátku a délky vzorku dle mezních časů z

kapitoly 5.3.1, ke kterým však musela být přičtena doba, jež byla potřebná k vygenerování výstupního signálu bílého šumu. Výsledný průběh takto získané impulzní odezvy a následný přepoččet na FRF je znázorněn na obrázcích (Obr. 6.4a), (Obr. 6.5a).



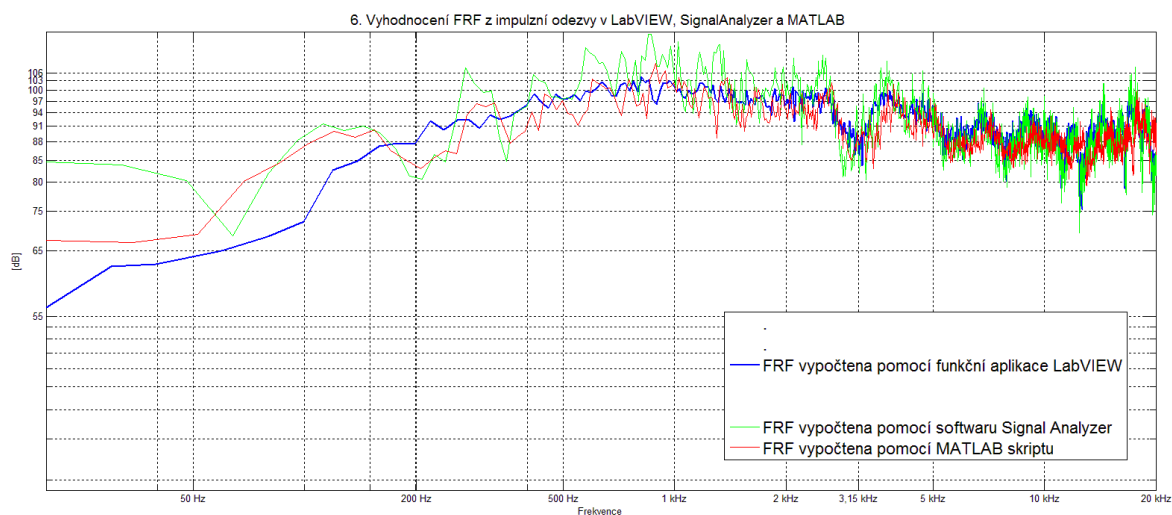
Obr. 7.1: Nastavení parametrů bloku "Trigger and Gate2" při odladování vytvořené aplikace

Druhým způsobem pak bylo využití tzv. expresního bloku z knihovny LabVIEW s názvem "Trigger and Gate2". (Obr. 7.1) Pro začátek spouště byla určena hodnota amplitudy IR, která je větší než šum v ní obsažený a zároveň určuje první výrazné zvlnění jejího průběhu. Dále se nastaví počet vzorků před touto první hodnotou a počet vzorků pro určení konce spouště. Průběhy takto získané IR a FRF jsou ilustrovány na (Obr. 6.4b), (Obr. 6.5b).



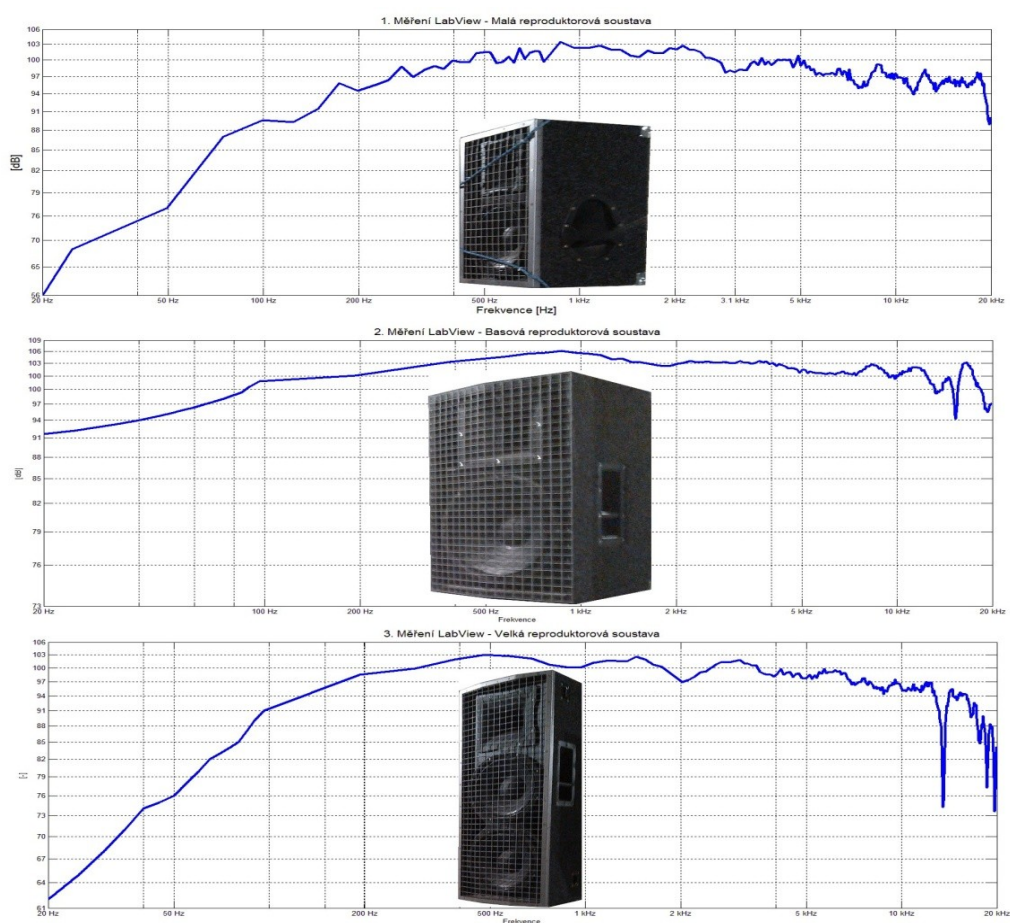
Obr. 7.2: Schéma LabVIEW 3 - Načtení zaznamenaných souborů wav z mikrofonu a zesilovače

Kontrola správného nastavení parametrů byla provedena srovnáním průběhu FRF z vytvořené aplikace (Digitální příloha B) s FRF získaným pomocí vytvořeného skriptu v prostředí MATLAB (Příloha D) a také pomocí softwaru Signal Analyzer.



Obr. 7.3: Srovnání FRF vyhodnocené pomocí programu LabVIEW a pomocí B&K LabPulse+SA

V poslední fázi pak bylo provedeno odladění na měřicí kartě NI, které zahrnovalo měření 3 zvolených reproduktorových soustav pomocí vytvořené aplikace a porovnání těchto měření s katalogovými hodnotami reproduktorů. Průběhy takto získaných FRF prezentuje následující obrázek (Obr. 7.4).



Obr. 7.4: Průběh FRF reproduktorových soustav získaných vytvořenou aplikací

8 Závěr

Cílem této práce bylo analyzovat základní metody pro zjištění přenosových vlastností reproduktorových systémů s jejich následným srovnáním prostřednictvím vyhodnocení experimentálního měření referenční reproduktorové soustavy realizovaného v aplikaci B&K Pulse – LabShop. Na základě tohoto srovnání pak byla vybrána optimální metoda, jež byla zahrnuta do funkční aplikace vyvinuté v prostředí LabVIEW a odladěna na měřicí kartě NI.

V teoretickém úvodu bakalářské práce byly objasněny fyzikální zákonitosti a veličiny stojící za vznikem a podstatou šíření zvuku. Dále byly popsány jednotlivé části a podstatné parametry reproduktorů, včetně stěžejního principu pro jejich samotné fungování.

V další části práce byly detailně rozebrány čtyři vybrané metody sloužící ke zjišťování přenosových vlastností reproduktorových soustav společně s jejich matematickou interpretací. V rámci této části byl také navržen vhodný měřicí řetězec pro získání potřebných signálů vstupujících do výpočtové části zahrnující analýzu těchto signálů ve vytvořených projektech aplikace B&K Pulse - LabShop, do kterých byly implementovány jednotlivé měřicí techniky.

V návaznosti bylo realizováno experimentální měření referenční reproduktorové soustavy v polobezodrazové místnosti VŠB-TUO pomocí všech 4 navržených technik. Na základě srovnání získaných výsledků, s ohledem na jejich přesnost, časovou a výpočetní náročnost, byla vybrána nejvhodnější metoda pro získání frekvenčních charakteristik.

V poslední části práce pak byla vybraná měřicí metoda zrealizována do podoby funkční aplikace vyvinuté v prostředí LabVIEW. Její odladění bylo provedeno na verzi této aplikace, jež je schopna načíst předem zaznamenané signály, a její funkčnost byla následně testována dalšími experimentálními měřeními tří vybraných reproduktorových soustav při současném porovnání získaných výsledků s katalogovými hodnotami výrobce.

Hlavní výhodou této jednoúčelové funkční aplikace je, že se stává nástrojem schopným plnohodnotně zastoupit měřicí systém firmy B&K, jehož pořizovací náklady jsou podstatně vyšší než vývojové prostředí LabVIEW spolu s měřicími kartami NI.

Vyvinutou funkční aplikaci, spolu s výsledky a postupy v této práci uvedenými, lze rovněž využít i pro výukové účely v rámci fakulty strojní VŠB-TUO.

9 Seznam použité literatury

- [1] NOVÝ, Richard. *Hluk a chvění*. 2. vyd. Praha: ČVUT, 1995, 389 s. ISBN 80-010-2246-3.
- [2] GEIST, Bohumil. *Akustika: jevy a souvislosti v hudební teorii a praxi*. Praha: Muzikus, 2005, 281 s. ISBN 80-862-5331-7.
- [3] Huygensův princip. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2013-05-15]. Dostupné z: http://cs.wikipedia.org/wiki/Huygens%C5%AFv_princip
- [4] Brownův pohyb. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2013-05-15]. Dostupné z: http://cs.wikipedia.org/wiki/Brown%C5%AFv_pohyb
- [5] SCHAUER, Pavel. *Akustika: učební texty pro magisterské, bakalářské, distanční a doktorské studium*. Brno: CERM, 2002, 57 s. ISBN 80-214-2069-3.
- [6] REJCHL, Jaroslav a Martin VŠETEČKA. *Encyklopedie Fyziky* [online]. 2006 [cit. 2013-05-15]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/>
- [7] ŠKVOR, Zdeněk. *Akustika a elektroakustika*. Vyd. 1. Praha: Academia, 2001, 527 s. ISBN 80-200-0461-0.
- [8] TOMAN, Kamil. *Reproduktory a reprosoustavy*. 1. vyd. Orlová: Kamil Toman, 2003, 212 s. ISBN 8591459280805.
- [9] SMETANA, Ctirad. *Hluk a vibrace. Měření a hodnocení*. 1. vyd. Praha: Sdělovací technika, 1998, 188 s. ISBN 80-901-9362-5.
- [10] KOSINA, Lukáš. O reproduktorech. In: *Repromania* [online]. 2005 [cit. 2013-05-15]. Dostupné z: <http://repromania.net/teorie/o-reproduktorech.php>
- [11] Krk systems. In: *Krksys.com* [online]. 2008 [cit. 2013-05-15]. Dostupné z: http://www.krksys.com/manuals/vxt/vxt8_datasheet_3_2010.pdf
- [12] Akustika, vznik a šíření zvuku. In: <http://homen.vsb.cz/> [online]. 2008 [cit. 2013-05-15]. Dostupné z: http://homen.vsb.cz/~ber30/texty/varhany/anatomie/pistaly_akustika.htm
- [13] TOOLE, Floyd E. *Sound reproduction: the acoustics and psychoacoustics of loudspeakers and rooms*. 1st ed. Amsterdam: Focal Press, 2008, xix, 550 s. ISBN 978-0-240-52009-4.
- [14] Brüel & Kjær [online]. [cit. 2013-05-15]. Dostupné z: <http://www.bksv.com/>

- [15] ČSN EN ISO 3745. *Akustika - Určování akustického výkonu zdrojů hluku pomocí akustického tlaku: Přesné metody pro bezodrazové a polobezodrazové místnosti*. Praha: Český normalizační institut, 2004.
- [16] Power Amplifier. In: *Tira Korea* [online]. 2002 [cit. 2013-05-15]. Dostupné z: http://www.tirakorea.com/2006/shaker/shaker_amp.php
- [17] *Prodance.cz* [online]. 2004 [cit. 2013-05-15]. Dostupné z: <http://prodance.cz/>
- [18] *National Instruments* [online]. 2012 [cit. 2013-05-15]. Dostupné z: <http://sine.ni.com/>
- [19] ČSN EN 60268-5. *Elektroakustická zařízení: Část 5: Reprodukory*. Praha: Český normalizační institut, 2004.
- [20] TŮMA, Jiří. *Zpracování signálů získaných z mechanických systémů užitím FFT* [online]. Praha: Sdělovací technika, 1997, 174 s. [cit. 2013-05-15]. ISBN 80-901-9361-7. Dostupné z: <http://homel.vsb.cz/~tum52/index.php?page=publications>
- [21] TŮMA, Jiří. *Signal processing*. 1. vyd. Ostrava: VŠB - Technická univerzita, 2009, 1 CD-ROM. ISBN 978-80-248-2114-6.
- [22] Akustické vlastnosti: Pulzní odezva reproduktoru. In: *Http://www.kv2audio.com/* [online]. 2011 [cit. 2013-05-15]. Dostupné z: <http://www.kv2audio.com/cz/technology/acoustic-design>
- [23] ČSN IEC 268-2. *Elektroakustická zařízení: Přesné metody pro bezodrazové a polobezodrazové místnosti*. Praha: Český normalizační institut, 1994.
- [24] HORÁK, David. *DISKRÉTNÍ TRANSFORMACE* [online]. 2012 [cit. 2013-05-15]. Dostupné z: http://mi21.vsb.cz/sites/mi21.vsb.cz/files/unit/diskretni_transformace.pdf
- [25] VLACH, Jaroslav, Josef HAVLÍČEK a Martin VLACH. *Začínáme s LabVIEW*. 1. vyd. Ilustrace Viktorie Vlachová. Praha: BEN - technická literatura, 2008, 247 s. ISBN 978-80-7300-245-9.

10 Seznam příloh

Příloha A: Katalogový list středobasového reproduktoru 10NW64 B&C Speakers	- 60 -
Příloha B: Katalogový list výškového reproduktoru ND 1411-M výrobce RCF	- 61 -
Příloha C: Kalibrační křivka ½“ mikrofону B&K typu 4189.....	- 62 -
Příloha D: Zdrojový kód pro výpočet FFT z hodnot impulzní odezvy v MATLAB.....	- 63 -
Příloha E: LabVIEW spouštěcí a zobrazovací okno aplikace	- 64 -

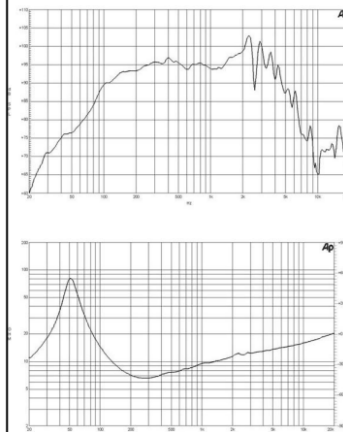
Digitální přílohy: (obsaženy v kořenovém adresáři CD uloženém v přídešti)

Popis digitální přílohy	Název souboru na CD
Digitální Příloha A: Aplikace v LabVIEW:	A_Aplikace_FRF_NI_Karta.vi
Digitální Příloha B: Aplikace v LabVIEW:	B_Aplikace_FRF_Nacteni_wav.vi
Digitální Příloha C: Zvuková stopa mikrofону:	C_Mikrofon_spl.wav
Digitální Příloha D: Zvuková stopa zesilovače:	D_Zesilovac_napeti.wav
Digitální Příloha C: Soubor s fotografiemi:	E_Fotografie z exp. měření
Digitální Příloha D: Text bakalářské práce:	F_Bakalarska_prace_Cinkraut.pdf

Tímto bych chtěl poděkovat svému vedoucímu bakalářské práce, panu Ing. Michalu Weiszovi a kolektivu výzkumné experimentální hlukové laboratoře při VŠB-TUO, za jejich užitečné rady, doporučení a poskytnuté technické prostředky, které výrazně přispěly ke vzniku této práce.

Jakub Cinkraut

PŘÍLOHY

**10NW64****LF Drivers - 10 Inches**

600 W continuous program power capacity
 64 mm (2.5 in) copper voice coil
 50 – 2500 Hz response
 96 dB sensitivity

Neodymium magnet allows a very light yet powerful motor assembly
 Shorting copper cap for extended HF response
 Ventilated voice coil gap for reduced power

Specification

Nominal Diameter	250 mm (10 in)
Nominal Impedance	8 ohm
Minimum Impedance	6.5 ohm
Nominal Power Handling (AES)	300 W
Continuous Power Handling	600 W
Sensitivity (1W/1m)	96 dB
Frequency Range	50 - 2500 Hz
Voice Coil Diameter	64 mm (2.5 in)
Winding Material	Copper
Former Material	Glass Fibre
Magnet Material	Neodymium Inside Slug
Winding Depth	16 mm (0.62 in)
Magnetic Gap Depth	8 mm (0.31 in)
Flux Density	1.25 T

Parameters

Fs	50 Hz
Re	5.2 ohm
Qes	0.27
Qms	4.5
Qts	0.26
Vas	27.5 dm ³ (0.95 ft ³)
Sd	320 cm ² (50 in ²)
EtaZero	1.3 %
Xmax	+/- 8 mm
Xvar	+/- 10 mm
Mms	47 g
Bl	17.5 Txm
Le	0.47 mH

Mounting & Shipping

Overall Diameter	261 mm (10.3 in)
Bolt Circle Diameter	245 mm (9.6 in)
Baffle Cutout Diameter	230 mm (8.8 in)
Depth	113 mm (4.4 in)

Mounting & Shipping

Flange and Gasket Thickness	13 mm (0.5 in)
Net Weight	2.9 kg (6.4 lb)
Shipping Weight	3.5 kg (7.7 lb)
Shipping Box	330x330x160 mm (13x13x6.3 in)

Design

Surround Shape	Double Roll
Cone Shape	Exponential
Magnet Type	Neodymium Inside Slug
Spider	Single
Pole Design	Straight Pole
Woofer Cone Treatment	TWP Waterproof – Both Sides

Service kit	RCK10NW648
-------------	------------

Příloha A: Katalogový list středobasového reproduktoru 10NW64 B&C Speakers

DRIVER ND1411-M

Professional High Frequency Transducer

The ND1411-M is a high performance 1.5-inch diaphragm compression driver with a 1.0 inch exit throat featuring a single piece, low compression, radial phase plug. The diaphragm and suspension are precision formed from .10 mm thick Mylar. The ND1411-M is a very compact size, versatile driver for professional applications.

PART NUMBER 15129019

Features

- 1.5-inch Diaphragm, 1.0-inch Exit Throat
- 50 watt Continuous program power handling
- Frequency range: 1500Hz - 20kHz
- Optimized geometry radial phase plug
- Very compact size for array applications
- Neodymium magnet assembly

Applications

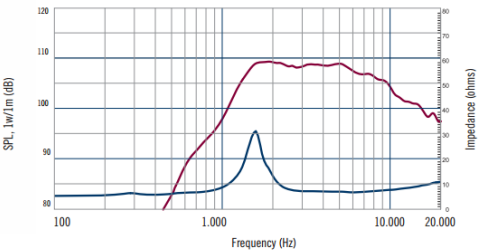
Compact 2-way systems, multiple-way medium throw systems, compact and medium size high quality line arrays. Unique driver in the market offering high power handling in 70 mm diameter. Very good linearity in combination with RCF HF94, HF64, HF101 horns.

General Specifications

Exit Throat Diameter	25.4	mm/inch
Rated Impedance	8	ohm
Power handling capacity ¹		
continuous program above 1.7 kHz	50	Watt
AES above 1.7 kHz	25	Watt
Sensitivity 1 W, 1 M, on axis, on horn ²	109	dB
Frequency Range ³	1500 - 20000	Hz
Diaphragm Material	Mylar	
Suspension Material	Mylar	
Suspension Design	Radial	
Minimum Impedance	7.0 ohm at 6000 Hz	
Voice Coil Diameter	35.5/1.5	mm/inch
Voice Coil Material	Edgewound aluminum	
Voice Coil Former Design	Straight - Nomex	
Number of layers	1 - Outside	
BL Factor	4.4	T - m
Flux Density	1.75	T
Phase Plug Design	10 radial slots	
Phase Plug Material	Composite	
Magnetics	Neodymium	
Voice Coil Demodulation		

Mounting Information

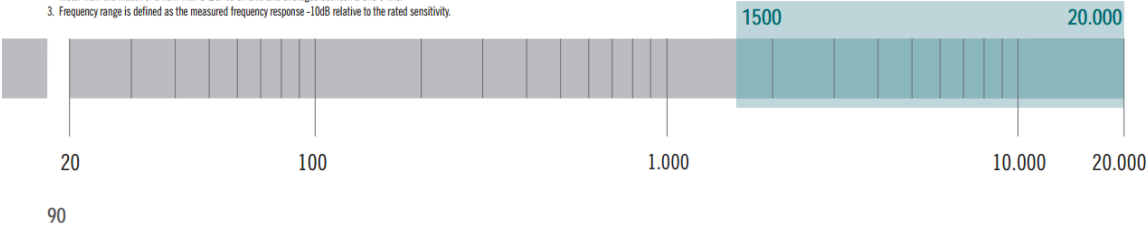
Overall Diameter	69/2.7	mm/inch
Overall Height	51/2.0	mm/inch
Mounting		
4 x 5 mm holes at 90 deg.	76.2/3.0	mm/inch
Net Weight	0.8/1.8	kg/Lbs
Shipping Weight	1.0/2.2	kg/Lbs



Frequency response and electrical impedance curve of the compression driver mounted on HF94 horn with input signal of 2.83 Volt.

Notes to Specifications

1. Continuous pink noise power ratings are derived from suggested AES standards sending a pink noise signal having a 6 dB crest factor with a high pass filter set at the specified lower limiting frequency for two hours. Continuous program power is a conservative power rating for reproduction of typical audio program material.
2. Sensitivity measurement is based on pink noise signal with input power of 1 watt and measured at 1 meter from the mouth of a horn with a Q of 15 on axis and averaged between 2 and 5 kHz.
3. Frequency range is defined as the measured frequency response -10dB relative to the rated sensitivity.



Příloha B: Katalogový list výškového reproduktoru ND 1411-M výrobce RCF

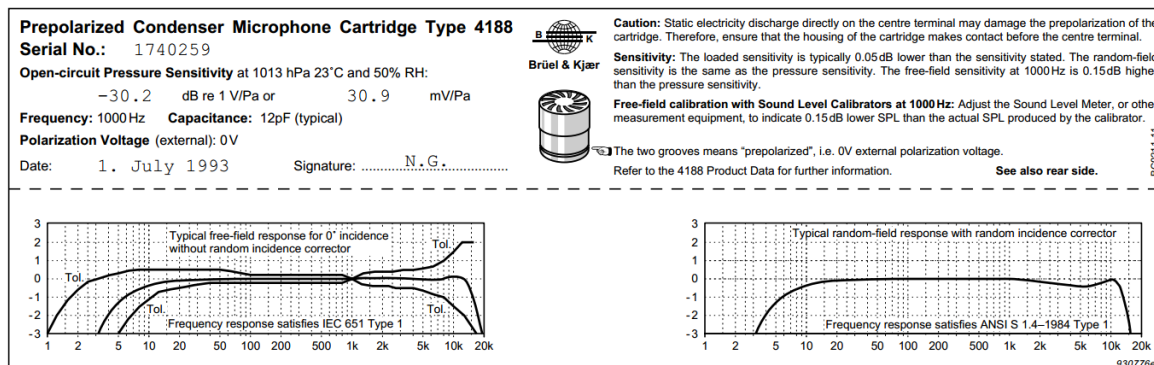
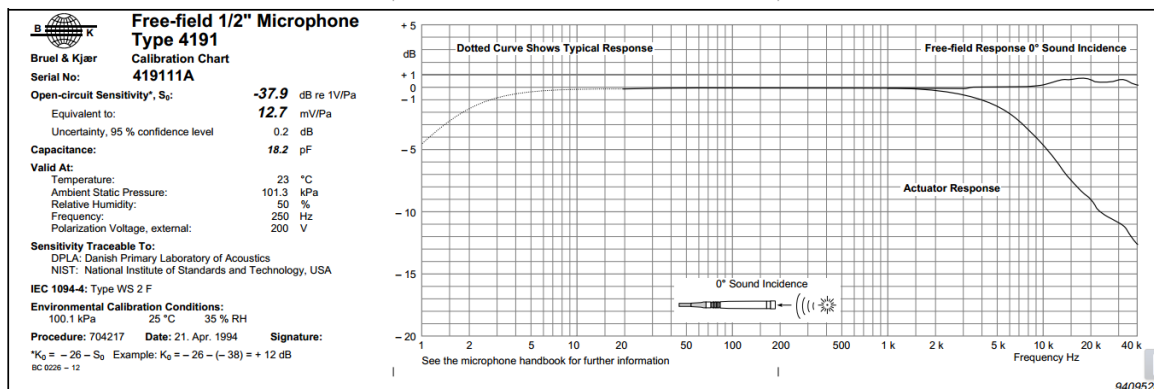


Fig.2 An example of a Calibration Chart (front and rear sides) supplied with a Prepolarized Condenser Microphone Type 4188



Příloha C: Kalibrační křivka 1/2" mikrofону B&K typu 4189

Zdrojový kód funkce pro výpočet a znázornění FRF z naměřených dat impulzní odezvy:

```
% RYCHLA FOURIEROVA TRANSFORMACE IMPUZNÍ ODEZVY SYSTEMU %
% Jakub Cinkraut
% Bakalarska prace - Mereni prenosovych vlastnosti reproduktorovych
systemu
% 2013

%Nacteni hodnot impulzni odezvy systemu:
load -ascii y_imp4k.txt          % Nacteni souboru dat (y_impall.txt)
                                % POTREBA ZVOLIT CESTU A NAZEV SOUBORU
y=y_imp4k;                      % Prirazeni nactenych hodnot promenne 'y'

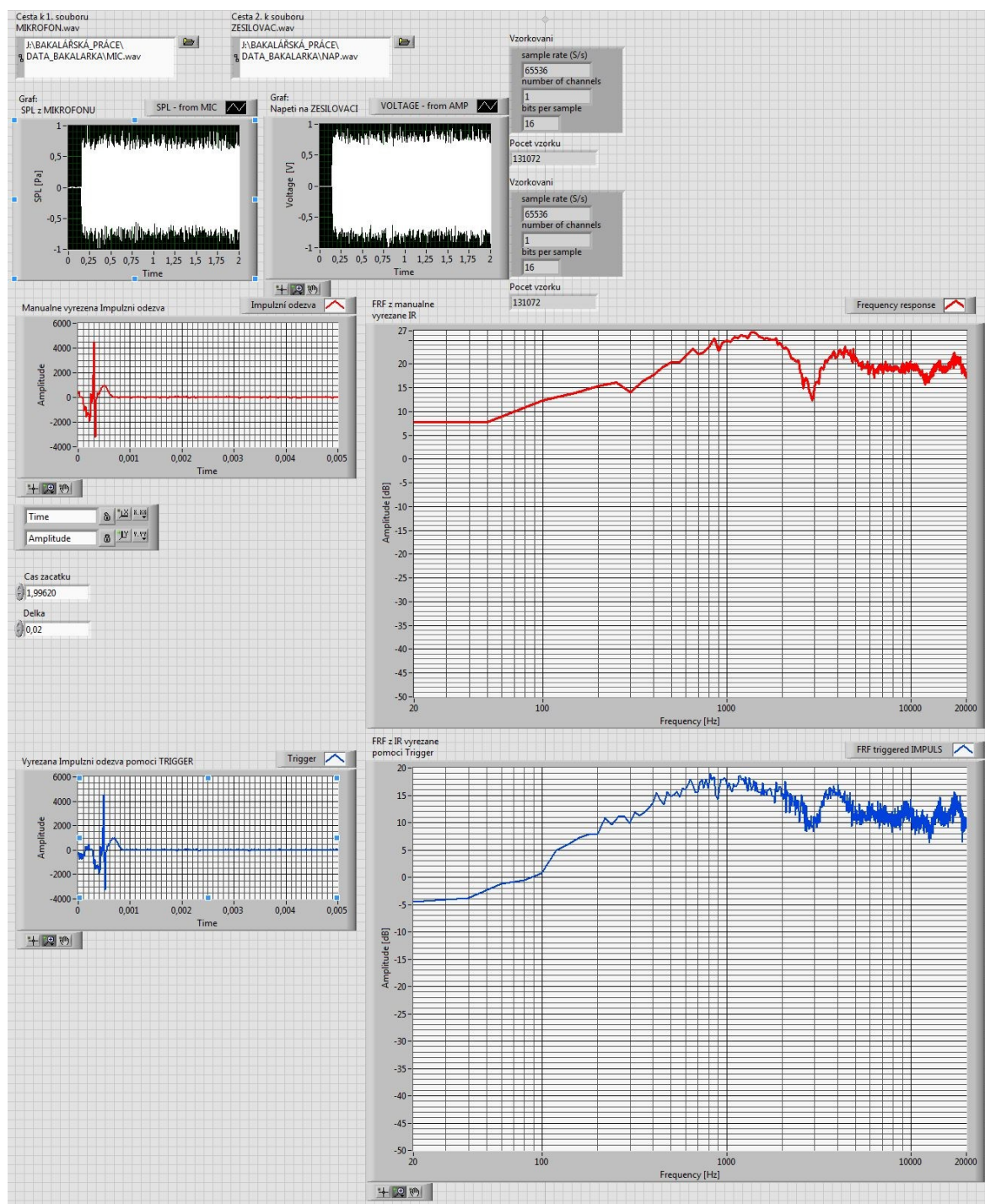
Fs=65536                        % Vzorkovaci frekvence merici karty [Hz]
                                % POTREBA DOPLNIT HODNOTU Fs
Nsamps = length(y);            % Pocet vzorku = delka vektoru 'y'
t = (1/Fs)*(1:Nsamps)           % Prepocet dat pro casovou osu

% Provedeni rychle Fourierovy transformace (FFT)
y=y/10e6                        % Prizpusobeni rozsahu amplitudy
y_fft = abs(fft(y));            % Zadrzeni amplitudy
y_fft = y_fft(1:Nsamps/2);      % Vyrazeni poloviny vzorku
f = Fs*(0:Nsamps/2-1)/Nsamps;   % Prepocet dat pro frekvencni osu

%Vykresleni impulzni odezvy reproduktoroveho systemu
figure
plot(t,y)
xlabel('Cas [s]')
xlim([0 0.00919])
grid on
ylabel('Amplituda')
title('Impulzni odezva reproboden')

%Vykresleni frekvencni charakteristiky ve frekvencni oblasti
figure
loglog(f,y_fft)                 % Graf FRF s logaritmickymi osami
grid on
xlim([20 20000])
xlabel('Frekvence [Hz]')
ylabel('Amplituda')
title('FRF')
```

Příloha D: Zdrojový kód pro výpočet FFT z hodnot impulzní odezvy v MATLAB



Příloha E: LabVIEW spouštěcí a zobrazovací okno aplikace